4.19



Spektrum der Wissenschaft

www.Spektrum.de 4.19

Kausalität in der Quantenwelt

Wenn Ursache und Wirkung verschwimmen



8,50 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN



MENSCHWERDUNG Warum sich *Homo sapiens* durchsetzte

MIXOTROPHES PLANKTON Zwischen Pflanze und Tier

OKTONIONEN Acht Dimensionen für das Standardmodell



EDITORIAL
KAUSALITÄT, FINALITÄT, QUANTENKAUSALITÄT

Carsten Könneker, Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

In meiner Diplomarbeit beschäftigte ich mich Ende der 1990er Jahre an der Universität zu Köln mit den grundlegenden Konzepten von Kausalität und Finalität. Die Frage, ob physikalische Prozesse vom Anfang her, also durch Ursachen, bestimmt sind oder vom Ende her, nämlich durch ihre größtmögliche Wirkung, faszinierte mich sehr. Im Alltag gehen wir für gewöhnlich davon aus, dass vorausgehende Ereignisse die Gegenwart prägen. Nicht verwunderlich daher, dass Pierre Louis Moreau de Maupertuis für viel Wirbel in der Gelehrtenwelt sorgte, als er 1744 das »Prinzip der extremalen Wirkung« vorstellte. Vor allem sein Landsmann Voltaire wetterte gegen die Vorstellung, der unbelebten Natur sei eine mathematisch erfassbare Zielorientierung immanent. Tatsächlich jedoch entpuppten sich Extremalprinzipien als ebenso mächtige Werkzeuge wie Differenzialgleichungen, um physikalische Prozesse aller Art zu beschreiben. Letztere halten in der Nachfolge Newtons das Kausalprinzip hoch, wonach jedem Ereignis ein anderes vorausgeht, das mit diesem zusammenhängt.

Zwar möchte unser Kopfkino zwei verschiedene Filme abspulen, wenn es um die Bestimmung des Jetzt aus dem Davor oder aber dem Danach geht, mathematisch jedoch ist beides gleichwertig.

Am markantesten kommt die Vorstellung einer durch und durch kausal bestimmten Welt in der Idee vom laplaceschen Dämon zum Ausdruck. Pierre Simon de Laplace postulierte 1814, eine hypothetische Superintelligenz könne aus dem gegenwärtigen Zustand des Universums sowohl jeden bisherigen als auch jeden zukünftigen bestimmen. Dazu müsse sie nur alle notwendigen Differenzialgleichungen kennen – und unglaublich gut rechnen können. In diesem Weltbild ist jeder Zustand eines Systems die Wirkung des früheren und die Ursache des folgenden.

Was aber, wenn die zeitliche Abfolge zweier physikalischer Zustände gar nicht feststellbar ist? Willkommen in der Quantenmechanik! Hier gibt es Situationen, bei denen wir partout nicht wissen können, ob ein Ereignis A zu B führte oder ob nicht B vielmehr A verursachte. Und da ist sie wieder, die Faszination. Ich empfehle Ihnen unsere Titelgeschichte über »Quantenkausalität« ab S. 12 herzlich zur Lektüre!

Ihr 



NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Physik – Mathematik – Technik 1.19 stellt 33 verblüffende physikalische Alltagsphänomene vor und erklärt, was dahintersteckt.

IN DIESER AUSGABE




PHILIP WALTHER UND ČASLAV BRUKNER

Die Wiener Physiker untersuchen die Grundlagen der Quanteninformationsverarbeitung – und fanden einen kuriosen Effekt (S. 12).


INGRID PASEMANN

THOMAS BÖLDICKE

Ab S. 40 stellt der Proteinforscher eine neue biologische Methode vor: den Einsatz von Antikörpern, die im Innern von Zellen wirken. Sie versprechen neue Erkenntnisse und medizinische Anwendungen.



ADITEE MITRA

Nahrungsnetze im Ozean sind das Spezialgebiet der Meeresbiologin. Wie »mixotrophes« Plankton – halb Pflanze, halb Tier – das marine Gleichgewicht beeinflusst, beschreibt sie ab S. 54.

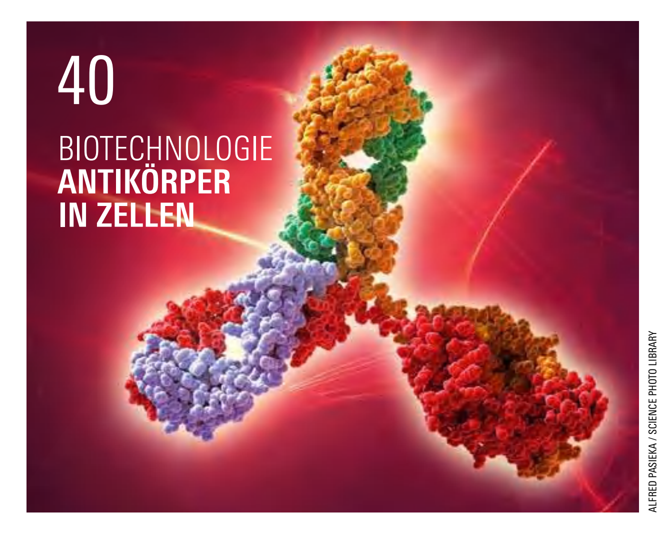
INHALT

TITELBILD:
TIERO / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

PHONLAMAIPHOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK



GABRIELE MALTINTI / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



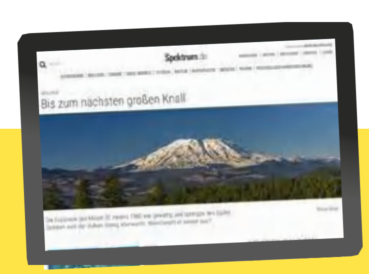
ALFRED PASIEKA / SCIENCE PHOTO LIBRARY



MARK ROSS STUDIO



OLEH_SLOBODENIUK / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



WIE EIN STAMM DICKER WIRD

Um möglichst hoch zu wachsen, ihr Gewicht zu tragen und alle Pflanzenorgane mit Nährstoffen zu versorgen, müssen Bäume dicke Stämme und Äste ausbilden. Das gelingt ihnen mit Hilfe des so genannten sekundären Dickenwachstums. Forscher um Thomas Greb von der Universität Heidelberg haben diesen Prozess nun genauer aufgeklärt.

Für das pflanzliche Dickenwachstum sorgt eine Zellschicht namens Kambium, in der sich Zellen durch Teilung fleißig vermehren. Sie sitzt zwischen dem inneren holzigen Teil der Sprossachse (dem »Xylem«) und dem äußeren Bast- und Rindenanteil (dem »Phloem«). Um herauszufinden, was mit den neuen Zellen geschieht, experimentierten Forscher um Greb mit Keimlingen der Ackerschmalwand *(Arabidopsis thaliana)*, des wichtigsten Modellorganismus der Pflanzenbiologen. In ihnen veränderten sie Kambiumzellen gentechnisch so, dass diese fluoreszierende Proteine herstellten und somit bei geeignetem Anregungslicht aufleuchteten. Teilten sich die modifizierten Zellen, ging die Fähigkeit zum Fluoreszieren auf ihre Tochterzellen über. Nach einigen Tagen des Wachstums untersuchte das Team Querschnitte der Sprossachse. Darin waren fluoreszierende Zellen – also Abkömmlinge des Kambiums – sowohl im holzigen Teil (rechts im Bild) als auch im Bastanteil (links) zu erkennen: Sie ziehen zwei grüne Bahnen durch die Zelllandschaft (lila). Demnach geben Stammzellen im Kambium ihre Tochterzellen abwechselnd in beide Gewebe ab, bringen also sowohl Holz als auch Bast hervor.

Development 10.1242/dev.171355, 2019

FOTO: DONGBO SHI; MIT FRDL. GEN. VON THOMAS GREB, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

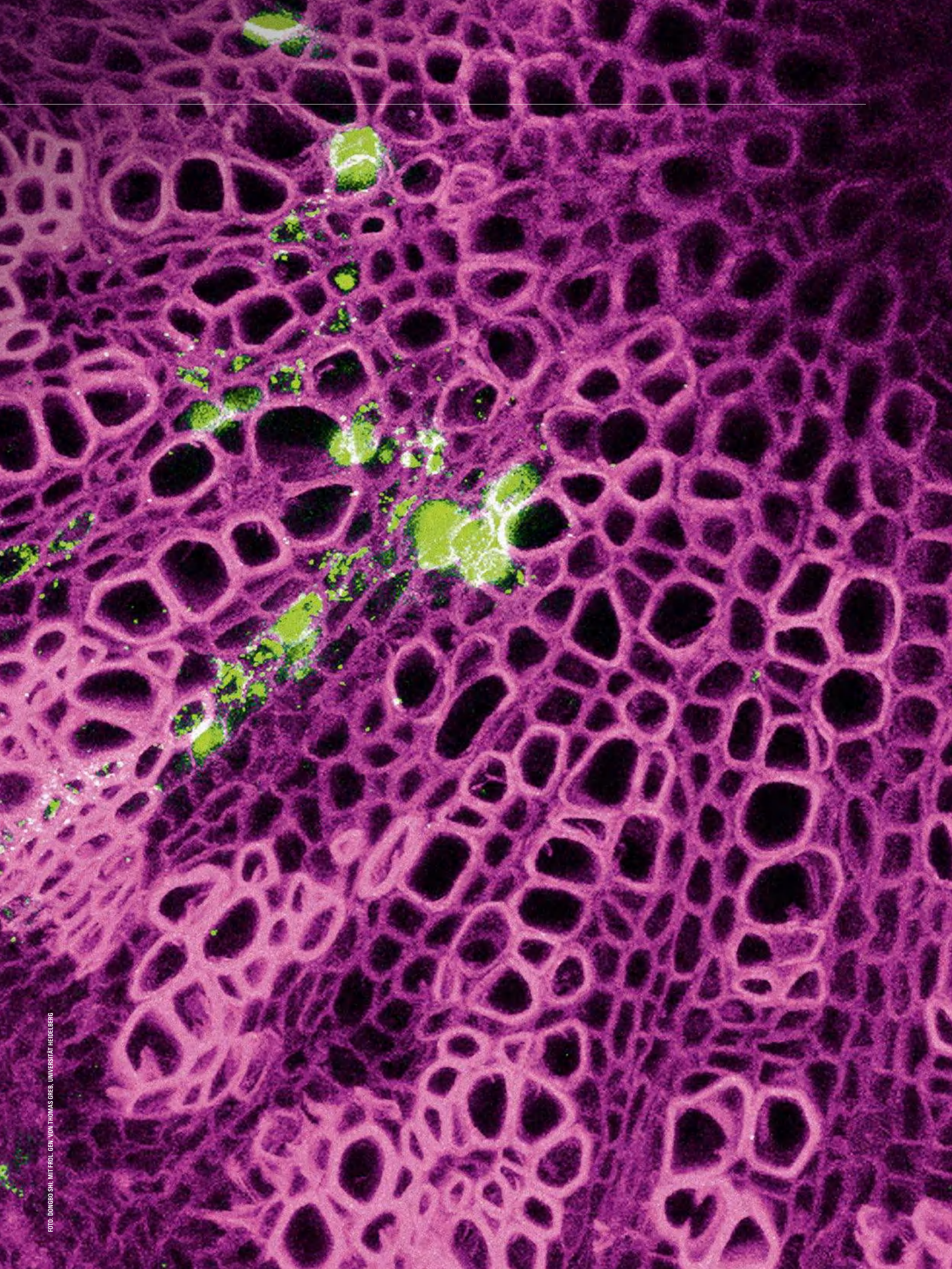
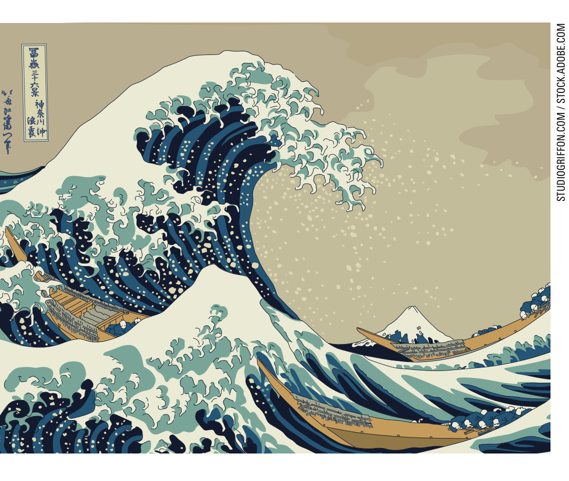


FOTO: DONGBO SHI; MIT FRDL. GEN. VON THOMAS GREB, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

PHYSIK
DIE ENTSTEHUNG VON MONSTERWELLEN



UNIVERSITY OF OXFORD; MCALLISTER, M.L. ET AL.: LABORATORY RECREATION OF THE DRAUPNER WAVE AND THE ROLE OF BREAKING IN CROSSING SEAS. J. FLUID MECH. 860, 2019



STUDIOGRIFFON.COM / STOCK.ADOBE.COM

Lange waren Monsterwellen ein Stoff aus Legenden. Wie aus dem Nichts sollten die gigantischen Wogen auf offener See auftauchen und dabei bedrohliche Höhen erreichen, berichteten Seeleute immer wieder. Am Neujahrsnachmittag 1995 wurde aus dem Mythos wissenschaftliche Realität: Unter der Draupner-Ölbohrplattform vor der norwegischen Küste spürten Messgeräte einen 26 Meter hohen Wasserberg auf.

Seither diskutieren Wissenschaftler verschiedene Entstehungsszenarien für das Phänomen. Ein Team um den Ingenieur Mark McAllister von der University of Oxford glaubt nun, eine dieser Theorien erhärten zu können. Demnach entstand die Draupner-Welle durch das Überlappen zweier gegenläufiger Wellenzüge. Das ist mit Blick auf die meteorologische Situation an Neujahr 1995 zumindest plausibel: Rekonstruktionen sprechen dafür, dass an diesem Tag im Bereich der Plattform starke, unterschiedlich ausgerichtete Winde aufeinandertrafen.

Die Rekonstruktion einer Monsterwelle im Wellenlabor (oben) hat Ähnlichkeit mit einem alten japanischen Farbholzschnitt (unten).

McAllisters Team hat den Seegang in solch einer Situation nun im Maßstab 1 zu 35 nachgestellt. In einem kreisförmigen Wellentank von 25 Meter Durchmesser ließen die Forscher wiederholt Wellenzüge unter verschiedenen Winkeln überlappen, wobei sich die Wogen stets konstruktiv überlagerten. Die kombinierten Wellen brachen jedoch meist, bevor sie eine mit der Draupner-Welle vergleichbare Höhe erreichten. Erst bei einem Aufeinandertreffen unter Winkeln zwischen 60 und 120 Grad änderte sich das. Hier störte das Brechen des Wellenkamms das Höhenwachstum nicht mehr, sondern beförderte es vielmehr. Fast vertikal schleuderten die überlappenden Wellen in diesem Fall Wasser nach oben, wodurch es eine Höhe erreichte, die – unter Berücksichtigung des Maßstabs – mit jener der Draupner-Welle vergleichbar ist.

Die entstehende Woge ähnelt, wie die Forscher überrascht feststellten, dem bekannten japanischen Holzschnitt »Die große Welle vor Kanagawa« aus den 1830er Jahren. Nicht auszuschließen, dass den Künstler Katsushika Hokusai damals eine echte Monsterwelle inspirierte.

Journal of Fluid Mechanics 10.1017/jfm.2018.886, 2019

GEOWISSENSCHAFT
KLIMAFOLGEN VON VULKANAUSBRÜCHEN

Heftige Vulkanausbrüche können den ganzen Planeten beeinflussen. Sie setzen mitunter große Mengen Schwefel frei, der in Kombination mit Schwebeteilchen die Sonnenstrahlung abhält und damit die Erde kühlen kann. Bisher gingen Wissenschaftler davon aus, dass vor allem Eruptionen in Äquatornähe einen Einfluss aufs Klima haben, da sich der Schwefel von dort aus leicht in beide Hemisphären verteilen kann und insgesamt länger in der Stratosphäre verbleibt.

Vermutlich unterschätzt man damit jedoch Vulkankatastrophen abseits der Tropen, argumentiert nun eine Arbeitsgruppe um Matthew Toohey vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel. Die Forscher haben anhand von Eisbohrkernen und Baumringen die Schwefelkonzentrationen sowie die Durchschnittstemperaturen auf der Nordhalbkugel in den vergangenen 1250 Jahren verglichen. Dabei zeigte sich eine auffällige Korrelation zwischen Vulkanausbrüchen und Kälteperioden. Die Daten der Geowissenschaftler deuten sogar darauf hin, dass die gleiche Menge freigesetzter Schwefel auf der Nordhalbkugel zu einer stärkeren Abkühlung führen kann als am Äquator. In einzelnen Regionen könne diese um bis zu 80 Prozent stärker ausfallen, berichten die Forscher.

Die Computersimulationen der Gruppe haben ergeben, dass die Klimawirksamkeit stark von der Jahreszeit sowie von der Höhe abhängt, in die die Vulkangase nach einem Ausbruch gelangen. Früher sei man davon ausgegangen, dass der Schwefel bei Eruptionen fernab der Tropen im Durchschnitt geringere Höhen erreicht, so die Wissenschaftler. Auch hätten Ausbrüche in der nördlichen Heimsphäre in den vergangenen Jahrhunderten weniger davon freigesetzt. Über längere Zeiträume betrachtet gelte beides aber wahrscheinlich nicht, mahnen die Autoren, weshalb Ausbrüche auf hohen Breitengraden mindestens genauso relevant fürs Klima sein könnten wie solche am Äquator.

Nature Geoscience 10.1038/s41561-018-0286-2, 2019

OSHAN WEDAGE, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MENSCHHEITSGESCHICHTE (MPI-SHH)

In der Fa-Hien-Lena-Höhle (oben) auf Sri Lanka gruben Forscher 45000 Jahre alte Werkzeuge aus, die aus den Knochen und Zähnen von Affen gefertigt wurden (unten).

ARCHÄOLOGIE
VOM GROSSWILD- ZUM AFFENJÄGER

Als der moderne Mensch vor etwa 45000 Jahren den Südzipfel des indischen Subkontinents erreichte, traf er dort auf eine ihm unbekannte Umwelt. Statt ausgedehnter Savannen oder arktischer Tundra, die *Homo sapiens* aus Afrika beziehungsweise dem nördlichen Eurasien kannte, erstreckte sich nahe dem Äquator dichter Urwald bis zum Horizont. Und statt auf jagdbares Großwild stießen unsere Vorfahren vor allem auf kleine Affen, die vermutlich ganz neue Jagdtechniken erforderten.

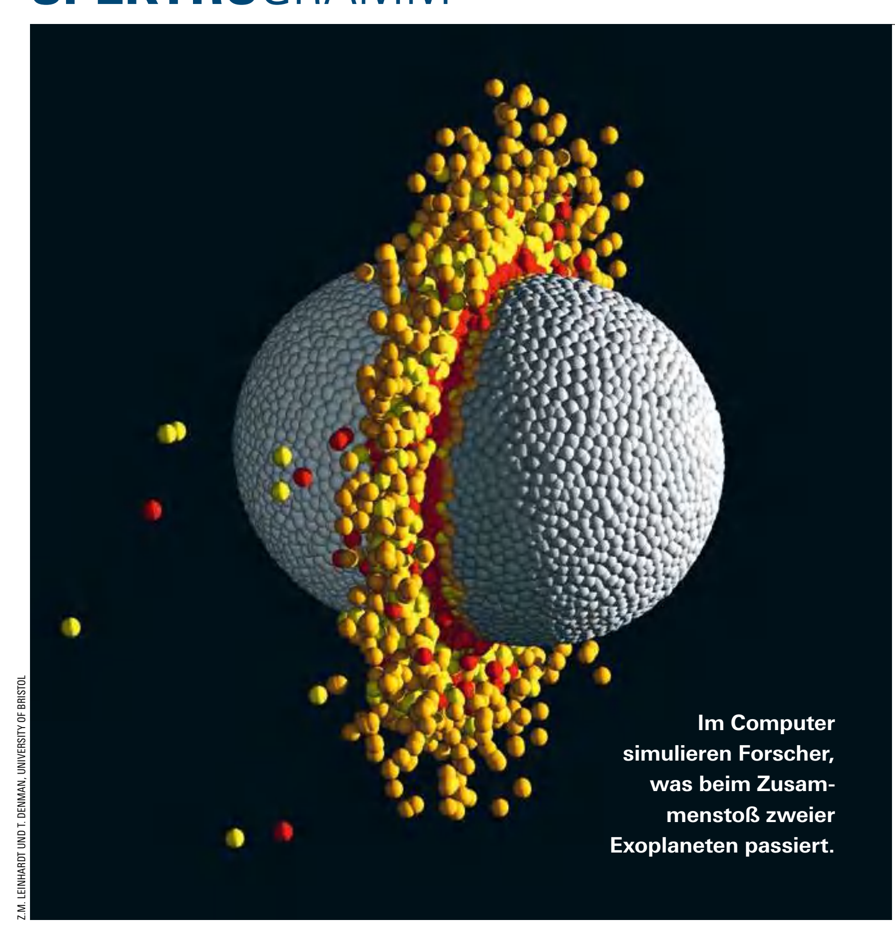
Hielt das den Menschen davon ab, in diesen Regionen sesshaft zu werden? Was Experten immer wieder vermutet haben, erscheint nun sehr unwahrscheinlich: Wissenschaftler um Patrick Roberts und Oshan Wedage vom Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena haben Indizien dafür aufgespürt, dass Menschen bereits vor etwa 45000 Jahren den Urwald Sri Lankas kolonisierten, also recht bald nachdem sie vor 50000 bis 55000 Jahren nach Asien vorgedrungen waren. Dafür sprechen jedenfalls Schnitt- und Brandspuren an Knochenfragmenten von Eichhörnchen und Affen, auf welche die Archäologen in der Fa-Hien-Lena-Höhle stießen.

Die Tiere, die offenbar fachmännisch zerlegt wurden, dienten dabei anscheinend nicht nur als Nahrung. Aus ihren Knochen stellten die Jäger auch Werkzeuge her, wahrscheinlich sogar Jagdwaffen. Zahlreiche Knochenspitzen aus der Höhle zeigen Beschädigungen, wie sie bei einem benutzten Geschoss zu erwarten sind. Während sich Neandertaler und Denisova-Menschen augenscheinlich nicht in die feuchtwarmen Regionen Asiens und Melanesiens vorwagten, scheint sich *Homo sapiens* recht schnell an seine neue Umwelt angepasst zu haben: Ähnlich alte Spuren wie die aus Sri Lanka, das noch bis vor wenigen tausend Jahren mit dem Festland verbunden war, finden sich auch auf Borneo.

Nature Communications 10.1038/s41467-019-08623-1, 2019



NOEL AMANO, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR MENSCHHEITSGESCHICHTE (MPI-SHH)



Im Computer simulieren Forscher, was beim Zusammenstoß zweier Exoplaneten passiert.

Z.M. LEINHARDT UND T. DENMAN, UNIVERSITY OF BRISTOL

ASTRONOMIE
ZUSAMMENSTOSS ZWEIER EXOPLANETEN

Astronomen haben eine ungewöhnliche Beobachtung in der Nähe des 1700 Lichtjahre entfernten Sterns Kepler-107 gemacht: Die beiden innersten Planeten des Systems sind etwa dreimal so groß wie die Erde, haben aber stark unterschiedliche Massen, wie Forscher um Aldo S. Bonomo vom Osservatorio Astrofisico di Torino mit Hilfe des HARPS-N-Spektrografen auf La Palma ermittelten. Während der innere Planet Kepler-107b rund das Dreifache der Masse unserer Erde auf die Waage bringt, ist sein Schwesterplanet Kepler-107c wohl mehr als zweieinhalbmal so schwer wie dieser.

Das Team macht eine gigantische Kollisionen für den ungewöhnlichen Unterschied verantwortlich – es wäre der erste nachgewiesene Crash dieses Ausmaßes außerhalb unseres Sonnensystems. Der gewaltige Zusammenstoß könnte einst große Teile des Gesteinsmantels von Kepler-107c abgesprengt haben, der vorher wesentlich voluminöser war. Dadurch würde der schwere Eisenkern des Planeten einen deutlich größeren Anteil der Masse ausmachen.

Zwar können Gesteinsplaneten auch ohne Kollisionen unterschiedliche Dichten aufweisen, zum Beispiel wenn flüchtige Bestandteile durch die Hitze des Zentralgestirns verdampfen. In diesem Fall wäre aber der innere Planet der dichtere, nicht der weiter außen gelegene, argumentieren die Astrophysiker.

Simulationen stützen die Hypothese: Sie zeigen, dass bei der Kollision zweier gleich großer Planeten genau die richtige Menge an Mantelmaterial pulverisiert würde. Fachleute vermuten schon lange, dass derartige Zusammenstöße eine große Rolle im Weltall spielen – in unserem Sonnensystem brachten sie einer verbreiteten Theorie zufolge den Erdmond hervor.

Nature Astronomy 10.1038/s41550-018-0684-9, 2019

BIOLOGIE
FITTE SPERMIEN FÜR FITTEN NACHWUCHS

Der Wettbewerb von Spermien auf dem Weg zur Eizelle verläuft als Sprint: Wer am schnellsten alle Hindernisse überwindet und zur Befruchtung schreitet, gewinnt. Doch möglicherweise spielt auch die Langlebigkeit eine Rolle und kann vielleicht sogar wichtiger sein als die Geschwindigkeit – zumindest bei Zebrabärblingen *(Danio rerio)*, einer Karpfenfischart.

So lässt sich jedenfalls das Ergebnis einer Studie um Simone Immler von der britischen University of East Anglia in Norwich interpretieren. Die Forscher gaben zu einem Wasser-Spermien-Mix nach 25 Sekunden einige Eizellen. Diese wurden deshalb nur von ausdauernden Exemplaren befruchtet. Spermien von Zebrabärblingen überleben in Süßwasser unterschiedlich lange: Während einige schon nach mehreren Sekunden bewegungslos bleiben, halten andere bis zu eine Minute durch.

Tatsächlich beobachteten die Biologen, dass Männchen, die aus einer Befruchtung mit einem ausdauernden Spermium entstanden sind, länger lebten und fitter waren als der Durchschnitt. Zudem zeugten die Fische in ihrem Leben mehr Nachwuchs. Bisher ist allerdings kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Robustheit von Spermien und Fitness oder Fortpflanzungserfolg bekannt. Unklar ist auch, inwieweit die Befunde an Zebrabärblingen auf Säugetiere oder gar den Menschen übertragbar sind. Schließlich unterscheiden sich Lebensraum und Fortpflanzung drastisch: Die meisten Fischarten befruchten abgelaichte Eier außerhalb des Körpers. Unter solchen Umständen dürfte das Überleben im offenen Wasser für Spermien eine wichtige Rolle spielen.

Dennoch sei es bemerkenswert, so die Biologen um Immler, dass miteinander konkurrierende Spermien im Ejakulat offenbar einem nach Qualität aussiebenden Selektionsverfahren unterworfen sind, das sich auch auf die kommende Generation auswirkt.

Evolution Letters 10.1002/evl3.101, 2019

TECHNIK
LASER ALS KLANGPROJEKTOR

Forscher haben einen Laser in einen rudimentären »Klangprojektor« verwandelt. Dieser kann akustische Informationen über mehrere Meter hinweg tragen und sie dann in einem wenige Millimeter großen Volumen in Form von Schallwellen freisetzen. Mit dem Verfahren könnten sich eines Tages Botschaften gezielt ins Ohr eines Empfängers übermitteln lassen, weshalb sich unter anderem Geheimdienste und das Militär für die Technik interessieren.

Das Team um Ryan Sullenberger vom Massachusetts Institute of Technology erprobte zwei unterschiedliche Verfahren der futuristischen Klangerzeugung. Bei beiden entsteht das zu projizierende Geräusch, wenn Wasserdampfmoleküle in der Umgebungsluft das Licht eines Lasers absorbieren. Dabei entstehen schwache Schallwellen, Physiker sprechen vom »photoakustischen Effekt«.

Um den Klang zu modulieren, variierten die Forscher bei der einen Variante die Amplitude des Lasers analog zum Frequenzverlauf des Geräuschs. Bei der anderen schwenkten sie den Laserstrahl mit Hilfe eines Spiegels, so dass sich Ersterer vor dem Ohr mit Schallgeschwindigkeit bewegte. Damit ließ sich ebenfalls ein künstliches Frequenzmuster erzeugen, das Menschen als Klang wahrnehmen.

Das zweite Verfahren hat den Vorteil, dass es echte Geheimkommunikation erlaubt, da die Bewegungen der Laserstrahlen ausschließlich in einer voreingestellten Distanz die erforderliche Schallgeschwindigkeit erreichen. Ein Zuhörer, der sich zwischen Sender und Empfänger drängt, bekommt die Botschaft daher nicht zu hören. Dafür ist die Übertragungsqualität schlechter als beim ersten Verfahren, berichten die Wissenschaftler.

Die Wellenlänge des Infrarotlasers wählten Sullenberger und seine Kollegen so, dass das Licht möglichst gut vom Wasserdampf absorbiert wird und keine Gefahr für das menschliche Auge besteht. Bislang haben die Wissenschaftler ihre Idee jedoch nur bei einer Distanz von zweieinhalb Metern getestet. Auch müsse man noch die Bandbreite der Technik erhöhen, damit sich nicht bloß einzelne Töne, sondern auch komplexere Klangmuster wie Wörter übertragen lassen.

Optics Letters 10.1364/OL.44.000622, 2019

ZOOLOGIE
GEHÖRNTE VOGELSPINNE

Angola war wegen des Bürgerkriegs zwischen 1975 und 2002 für Wissenschaftler lange Zeit nur schwer zugänglich. Doch nun gelang zwei südafrikanischen Forschern dort ein spektakulärer Fund: John Midgley vom KwaZulu-Natal Museum in Pietermaritzburg und Ian Engelbrecht von der University of Pretoria stießen auf eine bislang unbekannte Höckervogelspinnenart. Die mehrere Zentimeter langen Exemplare der neuen Spezies namens *Ceratogyrus attonitifer* tragen ein bizarres Horn auf ihrem Rücken. Laut den Wissenschaftlern ist es das längste und dickste Anhängsel, das bislang bei dieser Spinnenfamilie gefunden wurde.

Die Forscher hatten die Tiere bereits während zweier Expeditionen 2015 und 2016 in den Miombo-Waldsavannen von Angola gefangen. Tagsüber verstecken sich die Spinnen in Erdlöchern und attackieren sofort, wenn etwas in den Eingang gelangt. Die einheimische Bevölkerung kennt die Art schon lange unter dem Namen »Chandachuly«. Laut ihren Beobachtungen jagen die Achtbeiner Insekten; ihr Gift soll für Menschen nicht gefährlich sein. Bisswunden könnten sich aber wegen der schlechten medizinischen Versorgung in der Region entzünden und zum Tod führen.

Nicht alle Höckervogelspinnen besitzen einen Höcker, und bei Arten, die damit ausgestattet sind, ist er oft verhornt. Die Ausstülpung bei *Ceratogyrus attonitifer* ist dagegen weich. Ihre Funktion bleibt unklar, doch wie Engelbrecht vermutet, könnte sie etwas mit den Muskulatur des Magens zu tun haben.

Spinnen injizieren ein Verdauungssekret in ihr Opfer und lösen ihre Beute auf diese Weise noch außerhalb ihres Körpers auf. Die entstehende Flüssigkeit saugen die Tiere dann ein, um sich zu ernähren. Der Magen funktioniert dabei wie eine Pumpe, die das Material nach innen zieht. Das Horn sorgt nach Engelbrechts Ansicht womöglich dafür, dass die daran beteiligten Muskeln größer ausfallen und effizienter arbeiten.

African Invertebrates 10.3897/afrinvertebr.60.32141, 2019



Eine neu entdeckte Vogelspinnenart trägt einen sonderbaren Höcker auf der Oberseite.

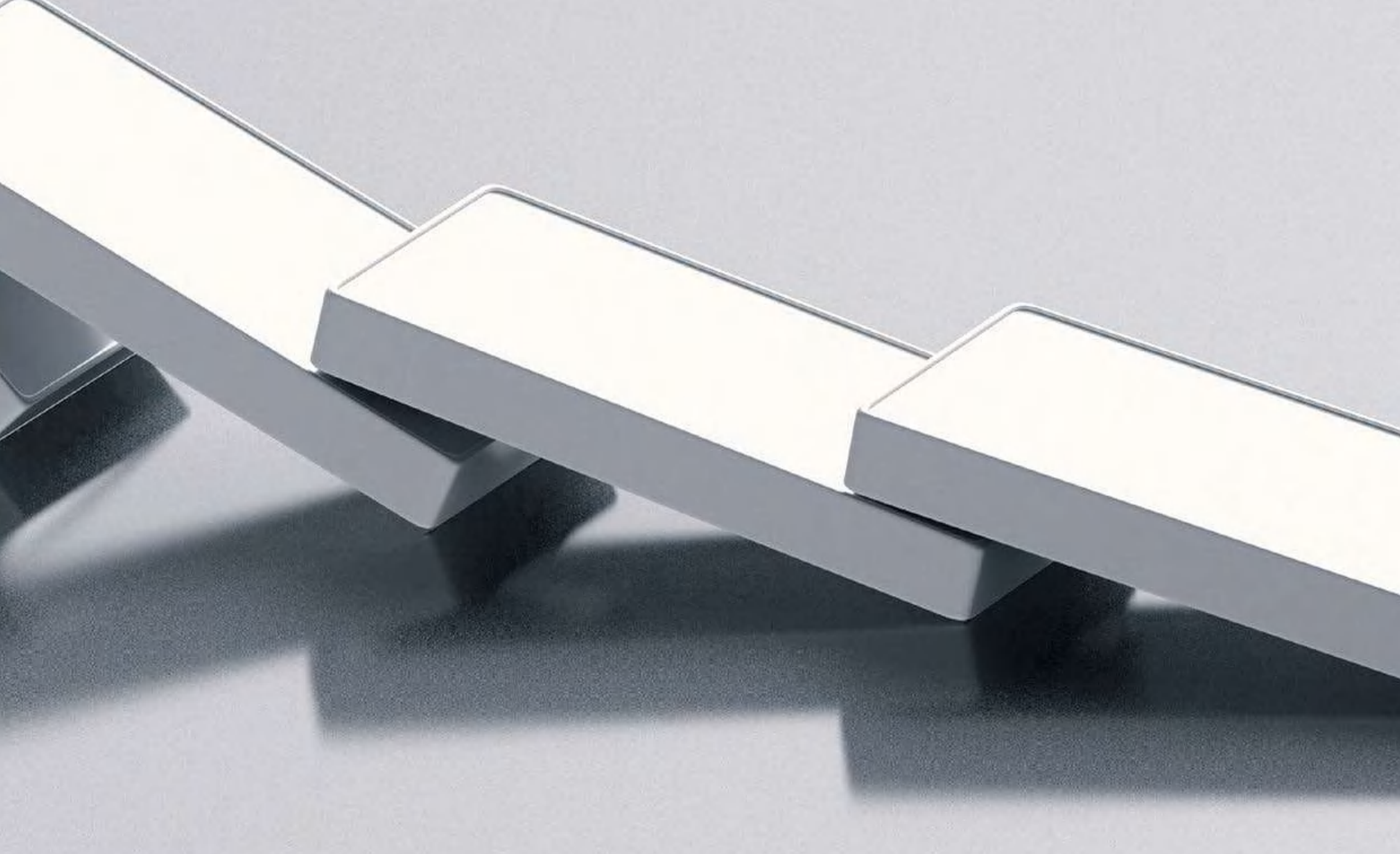


PHONLAMAIPHOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK

PHYSIK

KAUSALITÄT IN DER QUANTENWELT

Ein Ereignis ist stets entweder die Ursache oder die Wirkung eines anderen – so lautet ein ehernes Prinzip der Physik. Doch auf Quantenebene trifft das nicht immer zu.



Beim Dominoeffekt sind die Regeln von Ursache und Wirkung klar. In der Quantenmechanik hingegen können sich verschiedene Abläufe überlagern.

PHONLAMAIPHOTO / GETTY IMAGES / ISTOCK




Philip Walther (links) ist Professor für Physik an der Universität Wien und Gruppensprecher Quantenoptik, Quantennanophysik und Quanteninformation an der Fakultät für Physik. **Časlav Brukner** ist ebenfalls Professor für Physik an der Universität Wien und Direktor des dortigen Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI).

⏩ spektrum.de/artikel/1626454

Das Prinzip von Ursache und Wirkung ist uns seit der Kindheit vertraut: Wenn man den ersten Dominostein in einer fein säuberlich aufgestellten Reihe antippt, fallen mit einem befriedigenden Rattern innerhalb weniger Sekunden nacheinander alle Steine um. Der Dominoeffekt macht das Konzept der Kausalität greifbar, das überall in Wissenschaft und Alltag tief verwurzelt ist. Ereignis B, das Umkippen des letzten Dominosteins, ist eine Auswirkung von Ereignis A, dem Fallen des ersten Steins. B tritt erst nach A ein und nur dann, wenn A geschieht. Egal, ob zuerst der Stein ganz links in der Dominoreihe umkippt und somit das rechte Ende zuletzt oder ob wir ganz rechts beginnen und als letzter Stein der linke fällt, ein Ereignis muss das erste gewesen sein.

In der Quantenwelt gelten andere Regeln. Manchmal lässt sich nicht sagen, ob nun A vor B stattgefunden hat oder ob B vor A kam. Und zwar nicht, weil diese Information aus der Apparatur irgendwie nicht ausgelesen werden könnte oder besonders gut versteckt wäre. Sie existiert einfach nicht. Die Quantenphysik erlaubt die Überlagerung beider Abläufe, eine »Superposition« (siehe »Verschränkung und Superposition«, rechts). Das ist so, als würden die Dominosteine gleichzeitig sowohl von links nach rechts als auch von rechts nach links fallen.

Bei Experimenten mit einem einzelnen Lichtteilchen zeigten unsere beiden Wiener Arbeitsgruppen 2015, dass es unmöglich sein kann, zu sagen, in welcher Reihenfolge das Photon durch verschiedene Operationen gegangen ist, also ob von A nach B oder von B nach A. Ähnliche Experimente hat 2017 ein Team um Kevin Resch an der kanadischen University of Waterloo zusammen mit dem Theoretiker Robert Spekkens vom benachbarten Perimeter Institute for Theoretical Physics durchgeführt. Die Physiker überlagerten nicht nur zwei Abläufe, sondern ganz verschiedene Zusammenhänge. So erzeugten sie beispielsweise eine Quantenmischung aus einer direkten Ursache-Wirkungs-Beziehung – wie bei den Dominosteinen – und einer gemeinsamen Ursache-Beziehung. Für letztere ist eine klassische Analogie ein Regentag. Dieser kann zu üppigeren Wiesen, aber auch zum erhöhten Verkauf von Gummistiefeln führen. Schuhnachfrage und Pflanzenwachstum hängen jedoch nicht direkt voneinander ab. Die kanadischen Wissenschaftler haben es mit einem trickreichen Aufbau geschafft, mehrere solche grundverschiedenen Szenarien zu überlagern.

Gemessen an unserer Alltagserfahrung erscheint die Vorstellung unsinnig, es könne bei einem Vorgang keine eindeutige Reihenfolge der Ereignisse oder gar eine seltsame Mixtur unterschiedlicher kausaler Strukturen geben. Doch solche Experimente offenbaren: Wir müssen uns mit dieser weiteren seltsamen Eigenschaft der Quantenwelt abfinden – und vielleicht können wir sie sogar sinnvoll nutzen.

AUF EINEN BLICK
EIN REICH OHNE REIHENFOLGE

1. Eines der fundamentalen Prinzipien in der Physik ist das der direkten Kausalität. Es besagt: Ein Ereignis ist immer entweder die Ursache eines anderen oder wird von diesem verursacht.

2. In aufwändigen Quantenexperimenten erzeugen Forscher allerdings Situationen, in denen die Beziehung von Ursache und Wirkung zwischen Ereignissen nicht mehr eindeutig definiert ist.

3. Die Erkenntnisse könnten für effizientere Berechnungen auf Quantencomputern nützlich sein sowie neue Einsichten in die Schnittstelle von Quantenphysik und allgemeiner Relativitätstheorie gewähren.

Eine Frage so alt wie die Quantenphysik: Wer beeinflusst eigentlich wen – und wie?

Die Kausalität war bereits unter den Pionieren der Quantenmechanik ein heiß umstrittenes Thema. In Diskussionen und Gedankenexperimenten identifizierten Niels Bohr und Werner Heisenberg den Quantenzufall als eine wesentliche Eigenschaft der Theorie. Mit seiner »Kopenhagener Interpretation« bestand Bohr darauf, dass ein Resultat auf fundamentaler Ebene erst durch die Beobachtung zu Stande kommt und nicht etwa bereits vorher festliegt. Messergebnisse lassen sich nicht voraussagen – sie unterliegen dem reinen Zufall. Es gibt zuvor lediglich Wahrscheinlichkeiten.

Albert Einstein stellte hingegen die Zufälligkeit von Quantenprozessen in Frage. 1935 beschrieb er zusammen mit seinen Kollegen Boris Podolsky und Nathan Rosen ein Gedankenexperiment, das später unter dem Namen EPR-Paradoxon bekannt werden sollte. Dabei erzeugt eine Quelle zwei quantenmechanisch miteinander verknüpfte Teilchen, etwa ein Paar von Photonen. Eines fliegt zum Apparat der Beobachterin Alice, das andere zum weit entfernten Detektor von Bob. Die Photonen sind »verschränkt«, das heißt, die Resultate der Messungen sind auf eindeutige Weise verbunden. Bei Photonen ist die untersuchte Eigenschaft zum Beispiel häufig die Schwingungsebene des Lichtteilchens, die so genannte Polarisa-

tion. Pro Messeinstellung – es wird etwa erfasst, ob das Lichtteilchen horizontal oder vertikal polarisiert ist – gibt es zwei mögliche Resultate. Für jede dieser Einstellungen, von denen es beliebig viele geben kann, liefert eine Beobachtung ein Ergebnis. Wenn das andere Teilchen mit der gleichen Fragestellung gemessen wird, liegt wegen der Verschränkung dann sofort sein Wert fest.

Sobald Alice sich für eine Messeinstellung entscheidet und das Photon untersucht, weiß sie automatisch mit Sicherheit, welches Ereignis Bob misst, würde er die gleiche Messeinstellung wählen. Das weiß sie augenblicklich, also ohne an die Beschränkung durch die Lichtgeschwindigkeit gebunden zu sein und unabhängig von der Entfernung zwischen den zwei Laboren. Doch laut der speziellen Relativitätstheorie können sich Informationen nicht schneller als das Licht ausbreiten. Darum war für Einstein, Podolsky und Rosen die Konsequenz: Die Polarisation des Photons von Bob muss für alle möglichen Messeinstellungen irgend-

Hintergrund: Verschränkung und Superposition

Ein grundlegendes Konzept der Quantenmechanik ist die so genannte Superposition: Mehrere Größen können sich überlagern. So lange existiert ein Quantenobjekt gewissermaßen in verschiedenen Zuständen gleichzeitig.

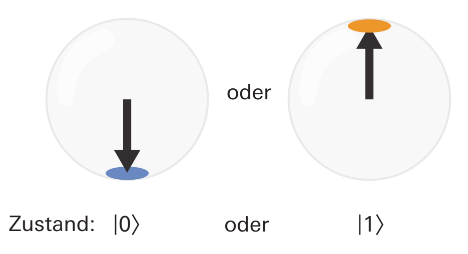
In unserer gewohnten klassischen Realität nehmen beispielsweise die in Computern üblichen Bits entweder den Zustand 0 oder 1 an; dem entspricht physikalisch etwa die magnetische Ausrichtung eines Teilchens nach unten oder oben. Bei einer Superposition hingegen befindet sich ein quantenmechanisches Bit (»Qubit«) in einer Überlagerung vieler möglicher Einzelzustände. Komplexe Zahlen (»Amplituden«) beschreiben deren jeweilige Anteile am Gesamtzustand.

Erst im Augenblick der Messung entsteht ein eindeutiger, klassischer Zustand. Die komplexen Amplituden liefern dann die reellen Wahrscheinlichkeiten dafür, das Bit als 0 oder 1 anzutreffen. Die Quantenmechanik erlaubt Superpositionen aller möglichen Eigenschaften, etwa von Lichtteilchen, Elektronen, Atomen oder deren Kombinationen in Versuchsaufbauten.

Die Superposition mehrerer Einzelobjekte heißt Verschränkung. Dabei setzen sich mindestens zwei Teilchen zu einem quantenmechanischen System zusammen, und die jeweiligen Einzelzustände (also beispielsweise ob Teilchen 1 beziehungsweise Teilchen 2 nach oben oder unten zeigt) sind dann nicht mehr unabhängig voneinander. Das Gesamtsystem lässt sich nur noch durch einen gemeinsamen Zustand beschreiben. Da die Teilchen untrennbar miteinander verknüpft sind, kann eine Messung am ersten Teilchen augenblicklich etwas darüber verraten, in welchem Zustand sich das zweite befindet – sogar, wenn beide Teilchen weit voneinander entfernt sind.

klassische Welt

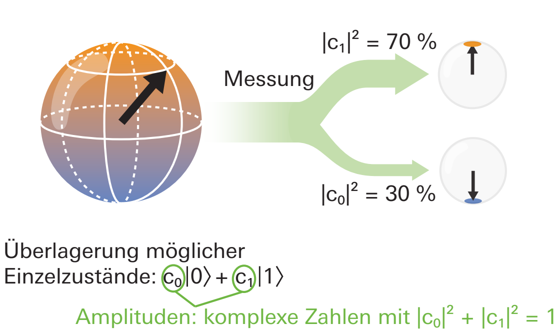
klassisches Bit



Zustand: $|0\rangle$ oder $|1\rangle$

Quantenwelt: Superposition

Qubit

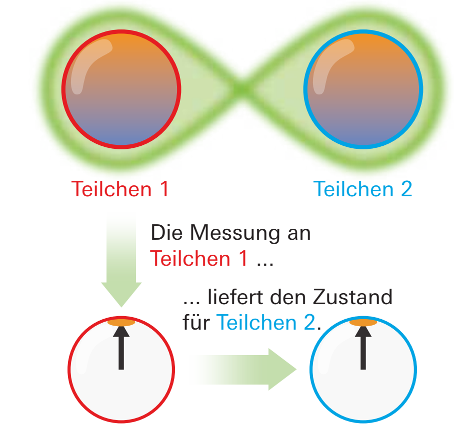


Überlagerung möglicher Einzelzustände: $c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$

Amplituden: komplexe Zahlen mit $|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$

Quantenwelt: Verschränkung

Superposition mehrerer Teilchen



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

wie bereits festgelegt gewesen sein, und zwar unabhängig davon, ob Alice ihr Photon beobachtet hat oder nicht. Da die Quantenmechanik es nicht zulässt, dass die Polarisation für jede denkbare Richtung bereits vor der Beobachtung feststeht, war die logische Folgerung, dass die Theorie unvollständig ist. In einer vollständigen Beschreibung wäre die Polarisation für alle Einstellungen durch »lokale verborgene Variablen« bereits zu Beginn vorherbestimmt und würde bei der Messung lediglich enthüllt.

Drei Jahrzehnte später brachte der Physiker John Bell in einem weiteren Gedankenexperiment das Konzept der lokalen verborgenen Variablen in Widerspruch zu den quantenmechanischen Vorhersagen. Er zeigte dabei genau auf, wie eine empirische Entscheidung darüber möglich ist, ob Einstein, Podolsky und Rosen Recht hatten oder ob die Quantenmechanik wirklich so seltsam ist, wie Bohr vermutete. Er löste damit eine Lawine an Experimenten aus. Seit Mitte der 1970er Jahre haben Physiker in zahlreichen Versuchen überprüft, ob das einzelne Messergebnis tatsächlich für jedes Photon objektiv zufällig ist. Immer und immer wieder mussten sie feststellen: Dem ist wirklich so. Einstein, Podolsky und Rosen lagen falsch. Quantenzufall geht über das hinaus, was wir im Alltag Zufall nennen, wie das Werfen eines Würfels oder einer Münze. Dort wissen wir das Ergebnis nicht vorher, weil wir nicht alle Parameter bis ins Detail kennen. Auf Quantenebene ist Zufälligkeit jedoch keine Konsequenz unseres Nichtwissens. Hier können wir das Ergebnis selbst dann nicht vorhersagen, wenn wir das System vollständig kennen.

In der Quantenwelt lässt sich vieles überlagern – sogar die Abfolge von Ereignissen

Trotz dieser seltsamen Eigenschaften schien zumindest die Kausalität auch auf der Ebene quantenmechanischer Phänomene weiterhin unerschütterlich zu sein. Es ist nämlich nicht möglich, Information ausschließlich durch Verschränkung zu übertragen. Alice kann Bob nichts mitteilen und ihn insofern nicht potenziell beeinflussen, allein indem sie ihr Photon vermisst. Sie kennt dann zwar den Zustand, in dem Bob sein Lichtteilchen vorfinden wird. Bob bringt das allerdings nichts, solange Alice ihm das Resultat nicht auf klassische Weise und somit begrenzt durch die Lichtgeschwindigkeit verrät.

Nichtsdestoweniger nutzen Quanteninformatiker inzwischen solche Phänomene der Verschränkung, um traditionelle Datenübertragung effizienter und sicherer zu machen, und entwickeln in so genannten Quantencomputern ganz neue Methoden für die Informationsverarbeitung. All das geht weit über das hinaus, was klassisch möglich ist. Aber die Abläufe dabei folgen dem vertrauten Prinzip von eindeutiger Ursache und Wirkung.

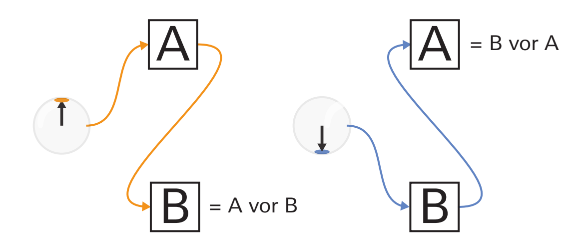
Doch die neuen Experimente enthüllen: In der Quantenphysik sind undefinierte kausale Verhältnisse möglich. Bestimmte Szenarien lassen die Existenz von zwei Ereignissen A und B zu, bei denen grundsätzlich nicht gesagt werden kann, ob A vorausgegangen ist und zu B geführt hat oder umgekehrt. Solche Quantenkausalitäten ermöglichen einen Informationsaustausch zwischen A und B, bei dem beide seltsamerweise gleichzeitig Sender und Empfänger sind. Der Trick besteht in einer geschickten Quantenüberlagerung von kausalen Reihenfolgen oder Ordnungen.

Wenn Ursache und Wirkung verschwimmen

Bei einem Experiment hängt die Reihenfolge, in der die Operationen A und B auf den Quantenzustand eines Systems wirken, von einem Schalter am Anfang ab. Ist er in Position 1, folgt B auf A, im Zustand 0 folgt A auf B. Das ist jeweils ein klassischer Fall – hier ist die Kausalität eindeutig. Ist der Schalter allerdings ein Qubit in Superposition, sind auch die Reihenfolgen der Operationen überlagert. Das bedeutet, A kommt vor B, und zugleich kommt B vor A.

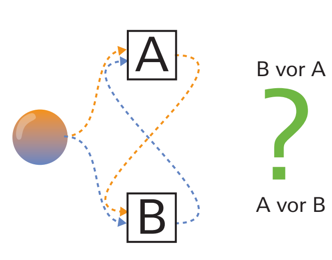
klassische Welt

Je nach Zustand des Schalters kommt entweder A vor B oder B vor A.



Quantenwelt

Ein Schalt-Qubit überlagert beide Möglichkeiten.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

Mit Superpositionen von Quantenzuständen haben Physiker schon viel Erfahrung. Sie nutzen dabei beispielsweise »Spins«, quantenmechanische Drehimpulse, die in einer Überlagerung der Zustände Auf und Ab existieren können, oder Photonen mit horizontaler und vertikaler Polarisation. Solche Quantenzustände sind Grundlage der so genannten Quanten-Bits oder Qubits, der Informationsträger in der Quantenkommunikation und bei Quantencomputern.

Eine kausale Überlagerung basiert auf dem gleichen Grundkonzept. Hier aber werden die Abfolgen von Ereignissen, die ein Quantenobjekt erfährt, in Superposition ge-

bracht. Beim Beispiel mit dem Photon können das die Anwendung einer Operation A und einer Operation B sein. Dann bestimmt entweder der Ausgangszustand von A den Eingangswert von B oder umgekehrt.

2009 schlugen der theoretische Physiker Giulio Chiribella, der inzwischen an der University of Hong Kong lehrt, und seine Kollegen eine Methode vor, bei der ein einziges Qubit als Schalter in so einem hypothetischen Aufbau fungiert. Es bestimmt die kausale Reihenfolge der Ereignisse für ein zweites Quantenteilchen. Wenn sich das Schalter-Qubit im Zustand 1 befindet, durchläuft das Teilchen zuerst Quantengatter A und dann Quantengatter B. Ist hingegen das Steuer-Qubit im Zustand 0, dann liegt B in der Reihenfolge vor A. Die Quantengatter können zum Beispiel jeweils eine Rechenoperation sein. Befindet sich das Steuer-Qubit aber in einer Superposition von 1 und 0, erfährt das zweite Qubit eine kausale Überlagerung beider Abfolgen. Der Aufbau ist dann ein »Quanten-Switch« ohne definierte Reihenfolge für die Gatter (siehe »Wenn Ursache und Wirkung verschwimmen«, links). 2012 zeigten weitere theoretische Untersuchungen von uns, dass so ein Quanten-Switch nur eines von mehreren Beispielen für eine unbestimmte kausale Struktur ist. Die Quantenphysik lässt noch mehr und durchaus exotischere Möglichkeiten zu.

Die Architektur eines realen Quanten-Switchs unterscheidet sich maßgeblich von herkömmlichen quantenoptischen Experimenten mit Interferometern. Diese bringen ein Lichtteilchen in Superposition. Ein Quanten-Switch hingegen überlagert die zwei unterschiedlichen Prozesse insgesamt – es sind also gewissermaßen mehrere ineinander verschachtelte Aufbauten nötig. Als klar war, wie das theoretisch funktionieren kann, machten sich unsere Arbeitsgruppen an die praktische Umsetzung und hatten 2015 Erfolg. Wir nutzten zwei Einstellungsmöglichkeiten eines einzelnen Photons: die Art seiner Ausbreitung (Propagationsmode genannt) und seine Polarisation. Mit diesen Freiheitsgraden codierten wir ein Steuer-Qubit und ein Target-Qubit. Bei dem Experiment gab das Steuer-Qubit die Art der Ausbreitung vor, und die Operationen A und B veränderten jeweils den Polarisationszustand des Lichtteilchens als Target-Qubit. Ist das Steuer-Qubit im Zustand 1, so wandert das Photon entlang einer Propagationsmode, in der die Operationen in der Reihenfolge AB stattfinden. Umgekehrt führt ein Steuer-Qubit in Zustand 0 zur Reihenfolge BA. Das Steuer-Qubit kann sich in einer Überlagerung befinden, zum Beispiel auf Grund eines Strahlteilers, der mit je 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit das Photon durchlässt beziehungsweise reflektiert. Daraufhin ist ebenfalls die Reihenfolge der Operationen überlagert.

Die erstaunliche Erkenntnis könnte schon bald handfeste Folgen haben. Der theoretische Physiker Lucien Hardy vom kanadischen Perimeter Institute schlug bereits 2007 vor, Quantenkausalitäten zu verwenden, um Quantencomputer zu beschleunigen. Deren Architektur basiert auf Qubits und deren Überlagerungen, was völlig neue Berechnungen ermöglichen soll (siehe »Quantentechnologien vor dem großen Sprung«, **Spektrum** Juni 2018, S. 12). Weltweit erproben zahlreiche Forschergruppen verschiedene Ansätze für die physikalische Natur der Qubits und für Quantenalgorithmen. Trotz ihres ungewöhnlichen Aufbaus gehorchen allerdings selbst Quantencomputer bisher den Regeln von Ursache und Wirkung.

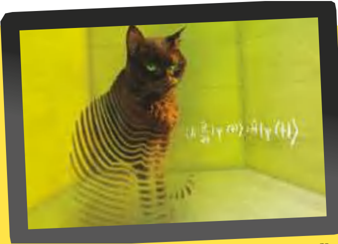
Basierend auf dem Quanten-Switch bestimmte Chiribella 2012 konkret, wie Quantenalgorithmen die undefinierten kausalen Abläufe nutzbar machen können. Daraufhin würden sie bestimmte Aufgaben effizienter lösen als Programme mit einer festen Reihenfolge von Quantengattern. Das ist beispielsweise der Fall, wenn bei zwei Operationen A und B die Frage lautet, ob sie kommutieren oder antikommutieren. Das heißt: Erhält man das gleiche Ergebnis, wenn man zuerst A und dann B ausführt, wie wenn A auf B folgt – oder ändert sich dabei das Vorzeichen? Ein Quanten-Switch-Algorithmus muss dazu die Rechnung nur einmal durchspielen. Mit dem in der Quanteninformatik gängigen, kausalen Schaltkreismodell hingegen wäre die Lösung der Aufgabe unmöglich. Denn hier müsste zumindest eine der beiden Operationen zweimal verwendet werden.

Mit unbestimmter Kausalität zu besseren Quantencomputern

Die nichtkausale Quanteninformationsverarbeitung ist nicht bloß bei dem einfachen Fall mit zwei Operationen überlegen. Im Gegenteil, der Rechenvorteil wächst sogar mit dem Umfang des Problems. Ein Quanten-Switch sorgt bei bestimmten Kommunikationsprotokollen, den so genannten Communication-Complexity-Problemen, für eine exponentielle Ersparnis bei der Datenmenge, die für den gegenseitigen Informationsaustausch nötig ist. Durch Algorithmen mit Quantenkausalität können wir von den seltsamen Eigenschaften der Quantenphysik also noch stärker profitieren.

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/quantenphysik**



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

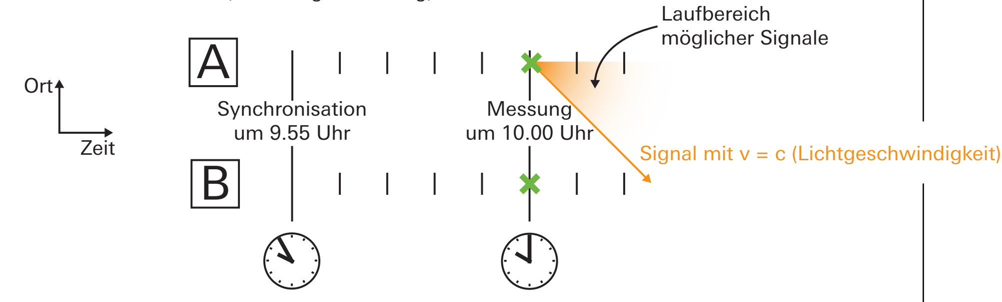
In einem Experiment von 2015 hat die Wiener Arbeitsgruppe um einen von uns (Philip Walther) die theoretischen Vorhersagen für den Extravorteil durch Quantenkausalität bestätigt. Die Physiker konstruierten einen Quanten-Switch und bestimmten damit, ob A und B kommutieren oder antikommutieren. Sie konnten die Fragestellung mit nur einem Durchlauf lösen, ohne dabei irgendeine Operation zweimal ausführen zu müssen. Bei diesen Versuchen haben die einzelnen Operationen den Zustand des Photons zwar verändert, aber ihn nicht direkt gemessen. Das ist ein wichtiger Unterschied: Man kann beispielsweise die Polarisationsrichtung drehen, ohne die Superposition zu zerstören. Anschließend befindet sich das System in einem anderen, allerdings weiterhin ein-

Schwerkraft und Quantenkausalität

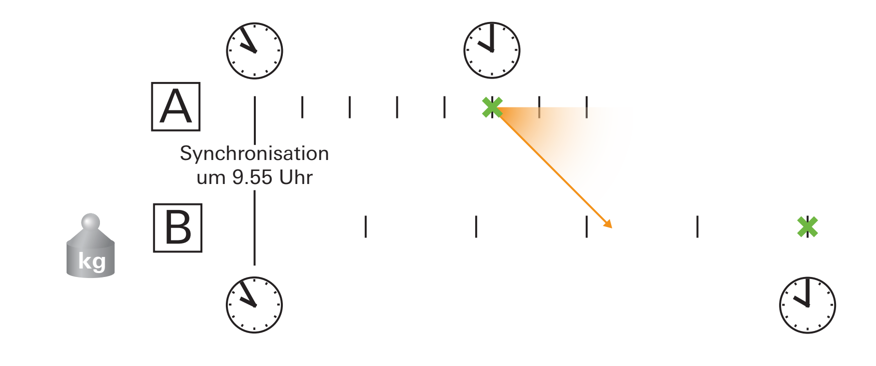
Alice und Bob vermessen Ereignisse, die jeweils um 10.00 Uhr in ihren Laboren stattfinden. (Die Markierungen auf die Achsen kennzeichnen Zeitintervalle einer Minute lokaler Zeit.) Alice und Bob synchronisieren ihre Uhren um 9.55 Uhr. Wenn die beiden Ereignisse raumartig getrennt sind, können A und B zwischen den Messungen kein Signal austauschen. Das heißt, beide beeinflussen sich nicht und sind voneinander weder Ursache noch Wirkung. Befindet sich jedoch eine Masse näher an Bobs Labor als an Alices, läuft Bobs Uhr auf Grund der allgemeinen Relativitätstheorie langsamer (»gravitative Zeitdilatation«). Nun kann ein Lichtstrahl, der bei Alice um 10 Uhr startet, Bob erreichen, bevor seine Uhr 10 schlägt – Ereignis A liegt in der Vergangenheit von Ereignis B. Ebenso kann, wenn sich die Masse näher an Alices Labor befindet, B mit einem Signal A beeinflussen. Die Quantenmechanik erlaubt die Superposition der beiden räumlichen Anordnungen der Masse. Die Überlagerung der Raumzeit sollte nun wie ein Steuer-Qubit wirken, und die Reihenfolge der Operationen A und B wäre nicht mehr eindeutig.

Kausalität in der Raumzeit

Zwischen den Messungen an beiden Orten kann kein Signal von A nach B laufen (raumartige Trennung).

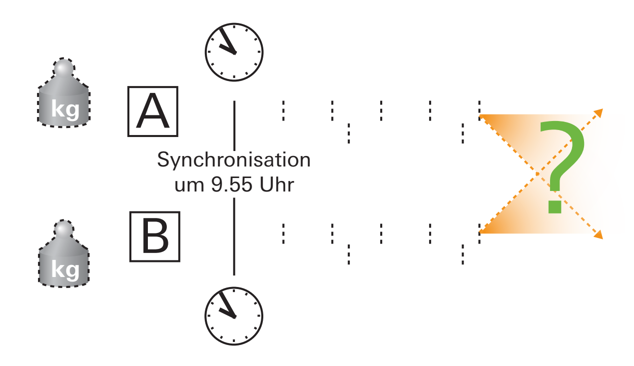


Eine Masse näher an B lässt die Zeit für B (aus Sicht von A) langsamer vergehen, so dass A erst messen und dann B beeinflussen kann, bevor es bei B 10.00 Uhr ist (zeitartige Trennung).



Kausalität in der Quanten-Raumzeit

Befindet sich die Masse in einer Superposition zweier Orte nahe A oder B, misst A vor B und zugleich B vor A.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MIKE BECKERS

deutig quantenmechanischen Zustand. Erst eine Messung würde ihn auf eine der verschiedenen klassischen Möglichkeiten festlegen.

Das Prinzip der Quantenkausalität hat sogar dann noch Bestand, wenn die Operationen mit einer Messung verbunden sind. Erst einmal klingt das widersprüchlich. Denn die Information darüber, welchen Weg das Photon gerade nimmt, verrät doch, ob Operation A oder B als Erstes durchgeführt worden ist. Allerdings muss man dabei berücksichtigten, wann ein Beobachter das im Prinzip in Erfahrung bringen kann. Deswegen hat eine Gruppe um einen von uns (Philip Walther) 2017 in einem weiteren Experiment überprüft, ob es bei der Quantenkausalität funktioniert, den Vorgang der Messung eines Quantenobjekts in Superposition zu bringen.

In dem Versuch wird das Ergebnis einer von zwei Operationen erst dann zugänglich, wenn beide in beliebiger Reihenfolge durchschritten sind. Dafür war ein noch komplexeres Interferometer nötig. Zunächst wird das Photon gemessen, wenn es Operation A durchläuft. Der springen-

de Punkt ist hier, dass dabei nichts ausgelesen wird, sondern sich beide möglichen Resultate ungestört weiter bewegen. Diese erreichen nun B, wo nur die Polarisation verändert wird. Ein Durchgang in umgekehrter Reihenfolge verläuft analog. Der optische Aufbau führt die beiden möglichen Ergebnisse von A (etwa: ein Photon ist horizontal oder vertikal polarisiert) so zu B, dass das Messresultat bis zum Ende des gesamten Prozesses verborgen bleibt. Im Vergleich zu dem früheren Experiment waren dafür mehrere überlagerte optische Bahnen nötig, aus denen sich die möglichen Pfade des Photons nicht ableiten lassen. Erst am Schluss kann man ablesen, welches Ergebnis bei A gemessen worden ist, aber ohne das Wissen, ob nun A oder B zuerst stattgefunden hat. Das Experiment hat gezeigt, dass sich bei der Quantenphysik die Reihenfolge wirklich jeglicher Art von Operation in Superposition befinden kann.

Möglicherweise gibt es Ereignisse mit echten undefinierten kausalen Strukturen noch an anderen Stellen in der Natur. Forscher auf dem Gebiet der Quantenkausalität führen Konzepte aus der Quanteninformation, der Informatik und der allgemeinen Relativitätstheorie zusammen. So wollen sie den Begriffen von Kausalität und Zeit ganz neu auf den Grund gehen.

Was passiert mit Ursache und Wirkung im Gefüge von Raum und Zeit?

Wenn die Raumzeit aus der allgemeinen Relativitätstheorie und die Effekte aus der Quantenphysik zusammenkommen, führt auch das zu quantenkausalen Strukturen. Denn theoretisch macht Superposition vor der Verteilung von Materie und Energie nicht Halt. Beispielsweise lassen sich zwei mögliche Aufenthaltsorte einer Masse im Raum überlagern. Das Team um einen von uns (Časlav Brukner) hat 2018 berechnet: Dann ist die Reihenfolge von Ereignissen in der Raumzeit vergleichbar mit jenen des Quanten-Switchs im Labor.

Die Idee beruht auf der so genannten gravitativen Zeitdilatation, einem wichtigen Effekt aus der allgemeinen Relativitätstheorie. Je näher sich ein Beobachter an einer anziehenden Masse befindet, desto langsamer verstreicht für ihn die Zeit (aus Sicht von weiter außerhalb des Gravitationsfelds). Um uns dieses Zusammenspiel näher anzusehen, denken wir uns zwei räumlich getrennte Labore, das von Alice und das von Bob. In jedem hängt eine Uhr. Beide werden morgens um 9.55 Uhr synchronisiert. Ein wenig später, um 10.00 Uhr lokaler Zeit, wenden sowohl Alice (Ereignis A) als auch Bob (Ereignis B) eine Operation auf ein Qubit an (siehe »Schwerkraft und Quantenkausalität«, links). Alice und Bob können währenddessen prinzipiell keine Signale austauschen – die beiden Ereignisse sind in der Sprache der allgemeinen Relativitätstheorie »raumartig« getrennt. Das bedeutet, A und B können voneinander weder Ursache noch Wirkung sein. Das ändert sich, wenn wir eine Gravitationsquelle bei den Laboren platzieren, und zwar näher an Bobs als an dem von Alice. Bobs Uhr tickt aus Sicht von Alice also langsamer. Bei ausreichender Zeitdilatation endet Ereignis A dann in einer kausalen Vergangenheit von Ereignis B. Die beiden sind darum jetzt nicht mehr raumartig, sondern »zeitartig« voneinander getrennt. Alice kann nun Signale an Bob senden und das Qubit, auf das sie die Operation zu ihrer Zeit um 10.00 Uhr anwendet, derart zu Bobs Labor übertragen, dass seine Operationen nach wie vor um 10.00 Uhr lokaler Zeit stattfinden. Wenn die Gravitationsquelle näher an Alices Labor liegt als an dem von Bob, kehren sich die Verhältnisse um. In dem Fall endet Ereignis B in einer Vergangenheit von Ereignis A.

Jetzt kommt die Quantenphysik ins Spiel. Damit können wir die Gravitationsquelle nicht bloß entweder an den einen oder den anderen Ort setzen, sondern in eine Überlagerung der beiden bringen. Das stellt eine Superposition von »A bewirkt B« und »B bewirkt A« her – wie beim Quanten-Switch.

Es wird schwierig sein, in Experimenten zu überprüfen, ob solche Fälle in der Natur wirklich vorkommen. Allerdings berühren aktuelle Forschungsvorhaben bereits einige Aspekte solcher Fragen. Verschiedene Teams überlagern beispielsweise immer massereichere Objekte in quantenmechanischen Experimenten (siehe »Ein Stückchen Schwerkraft«, **Spektrum** August 2018, S. 18).

Derartige Versuche helfen vielleicht bei der Antwort auf wichtige Fragen: Gibt es auch bei der Gravitation auf kleinsten Skalen keine klassische Kausalität mehr? Wie geht so ein System in eines mit den gewohnten Ursache-Wirkungs-Beziehungen über? Welche Rolle spielt dabei die Zeit? Bei großen Quantensystemen vermuten einige Physiker, dass Überlagerungen nach einer masseabhängigen so genannten Dekohärenzzeit gewissermaßen von selbst in einen eindeutigen Zustand kollabieren (siehe »An der Grenze zur Quantenwelt«, **Spektrum** August 2018, S. 12). Solchen Modellen zufolge könnte der Effekt für eine kausale Ordnung der Raumzeit sorgen. Auch wenn sie richtig wären, sollte es allerdings möglich sein, nichtklassische Effekte wie beim Fall von Alice und Bob nachzuweisen, noch bevor es zur Dekohärenz kommt.

Seit den Anfängen der Quantenmechanik wird immer klarer, dass sie uns abverlangt, einfache klassische Vorstellungen aufzugeben. Wir müssen seit Jahrzehnten den Doppelcharakter von Objekten als Welle und Teilchen und ihre Parallelexistenz in mehreren Zuständen hinnehmen. Nun scheint es unausweichlich, außerdem zu akzeptieren, dass ein Ereignis manchmal zugleich Ursache als auch Wirkung eines anderen ist – mit paradoxen, aber ebenso spannenden Konsequenzen. ◂

QUELLEN

Chiribella, G. et al.: Quantum computations without definite causal structure. Physical Review A 88, 2013

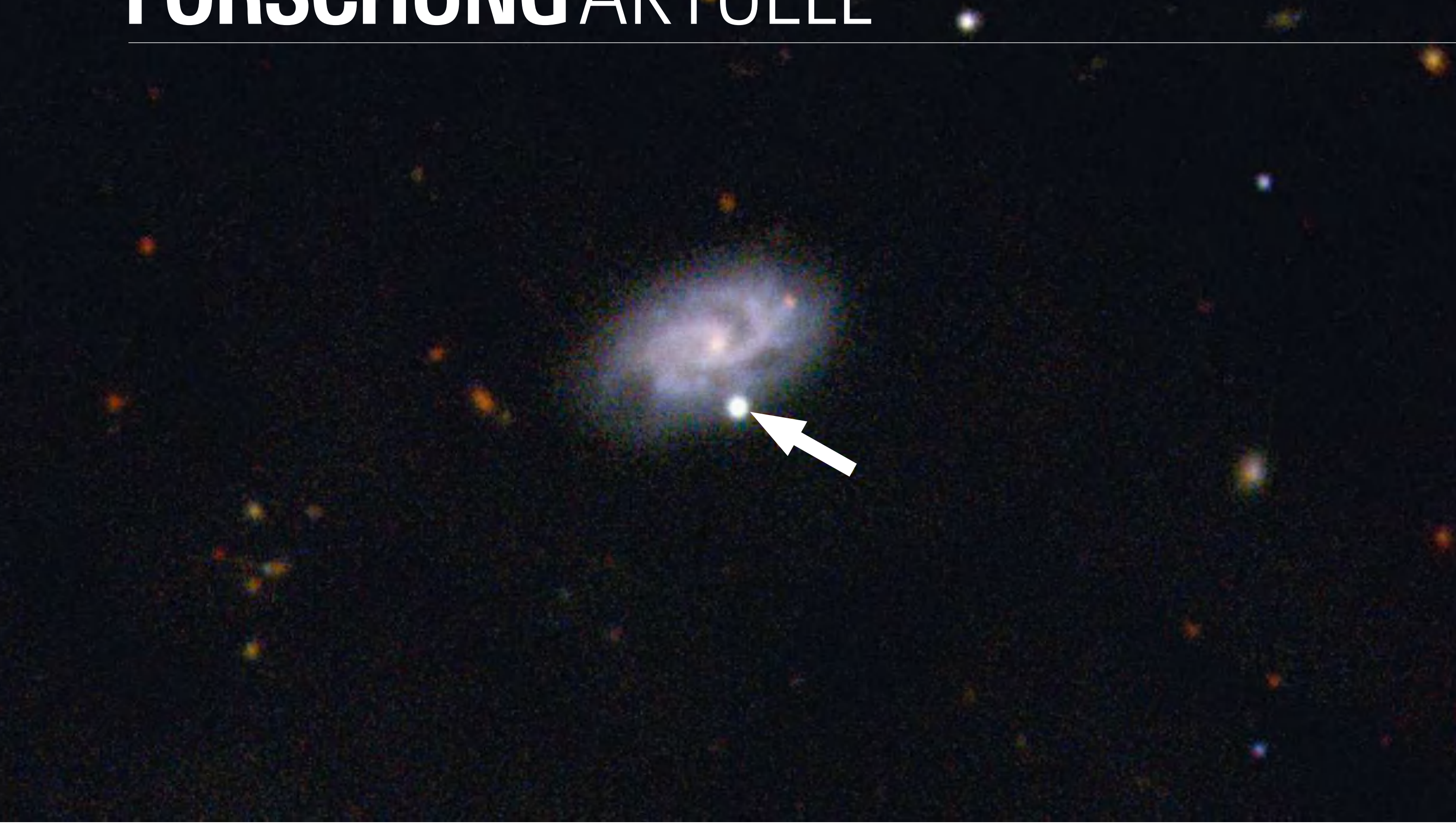
Guérin, P.A. et al.: Exponential communication complexity advantage from quantum superposition of the direction of communication. Physical Review Letters 117, 2016

Oreshkov, O. et al.: Quantum correlations with no causal order. Nature Communications 3, 2012

Procopio, L.M. et al.: Experimental superposition of orders of quantum Gates. Nature Communications 6, 2015

Rubino, G. et al.: Experimental verification of an indefinite causal order. In: Science Advances 3, 2017

Zych, M. et al.: Bell's theorem for temporal order. arXiv 1708.00248, 2018



GRAN TELESCOPIO CANARIAS / INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA (IAA-CSIC)

ASTRONOMIE

FOLGENREICHE STERNEXPLOSION

Nicht jede Supernova wird von einem gewaltigen Gammastrahlenausbruch begleitet. Warum es oft nicht dazu kommt, könnte ein weiteres Produkt einer solchen Sternexplosion erklären: ein »Kokon« aus heißer Sternmaterie. Nun scheinen Forscher erstmals ein solches Objekt beobachtet zu haben.

Der Brennstoff extrem schwerer Sterne mit mehr als dem Achtfachen der Masse unserer Sonne reicht nur für einige Millionen Jahre. Sobald die Fusionsprozesse im Sternzentrum versiegen, kollabiert der Kernbereich binnen Sekunden zu einem 10 bis 20 Kilometer großen Klumpen mit der Dichte eines Atomkerns: einem Neutronenstern.

Weiter außen liegende Schichten sacken dadurch ins Bodenlose. Das heiße Gas fällt auf die Materie in der Mitte, wo es wie an einer Wand abprallt. Es entsteht eine gewaltige Stoßwelle, welche – zusätzlich angetrieben von einer unvorstellbaren Anzahl Neutrinoteilchen aus dem Kern – die einstige Sternhülle vor sich herschiebt. Solch eine »Kernkollaps-Supernova« strahlt ein paar Wochen lang heller als alle Sterne ihrer Galaxie zusammen, und noch Jahre später lässt sich die immer weiter expandierende Blase mit Teleskopen beobachten.

Die Ereignisse zählen zu den gewaltigsten im Universum, sie haben jedoch Konkurrenz: So genannte Gammastrahlenausbrüche (englisch gamma ray bursts, GRBs) setzen binnen kurzer Zeit ebenfalls enorm große Energiemengen frei. Supernovae und GRBs sind nicht zwei voneinander unabhängige Ereignisklassen – bloß gehen manche extrem helle Supernovae mit einem mehrere Minuten langen Gammastrahlenausbruch einher, andere hingegen nicht. Aber warum ist das so? Antworten erhoffen sich Astronomen von der nun veröffentlichten Auswertung einer ungewöhnlichen Sternexplosion vom 5. Dezember 2017. Das Ereignis mit der Bezeichnung SN 2017iuk gehört zur seltenen Fraktion der »Hypernovae«, die zehn- bis mehrere hundert Mal heller leuchten als gewöhnliche Vertreter ihrer Art. Der US-amerikanische Satellit Swift registrierte einen etwa drei Minuten langen Gammastrahlenausbruch.

Davon alarmiert, schwenkten Astronomen um Luca Izzo vom spanischen Instituto de Astrofísica de Andalucía schon anderthalb Stunden nach dem GRB das 10-Meter-Teleskop

Wenige Stunden nach dem Gammastrahlenausbruch zeigt sich die Hypernova SN 2017iuk in einer Aufnahme des Teleskops Grantecan auf La Palma als hell leuchtender Fleck (Pfeil).

Grantecan auf der Kanareninsel La Palma in Richtung der winzigen Himmelsregion, aus der das Signal kam. Dann nahmen sie ein Lichtspektrum des Gebiets auf, in dem sich eine rund 530 Millionen Lichtjahre entfernte Spiralgalaxie befindet.

Bei dem Ereignis handelte es sich um eine jener seltenen Supernovae, die von einem Gammastrahlenausbruch eingeläutet werden. Hier spielen vermutlich Magnetfelder eine Schlüsselrolle. Wenn der Kern eines Sterns bei einer Supernova kollabiert, verdichten sich auch diese. Bei Neutronensternen sind sie deshalb milliardenfach stärker als bei ihren Vorläufersternen. Die Rotationsrate nimmt beim Kollaps ebenfalls zu. Damit schleudert ein sich rasant drehendes Objekt ein extremes Magnetfeld um sich herum. Oberhalb der beiden Pole bilden sich gewissermaßen Schornsteine, durch die Materie aus dem Inferno entkommen kann – so sieht es zumindest ein unter Physikern populäres Szenario vor.

Selbst der schnellsten Materie geht manchmal die Puste aus

Zwei gegenläufige Bündel, so genannte Jets, schießen demnach in den ersten Sekunden nach dem Kollaps in Richtung Weltall. Die Jets beschleunigen geladene Teilchen fast bis auf Lichtgeschwindigkeit und durchstoßen zusammen mit der Schockwelle der Supernova die weiter außen befindlichen Sternhülle. Wo das Material der Jets auf umgebendes, langsamer expandierendes Gas trifft, entsteht Gammastrahlung.

Seit Längerem diskutieren Fachleute über einen dritten Protagonisten neben Schockwelle und Jets. Demnach würde bei einer Kernkollaps-Supernova eine als Kokon bezeichnete Materiewolke eine Brücke zwischen den beiden Phänomenen schlagen. Sie könnte auch erklären, wieso nur wenige der Sternexplosionen mit einem Gammastrahlenausbruch einhergehen. Kokons entstehen, während sich die schmalen Jets einen Weg durch die umgebende Materie bahnen. Kollisionen mit deren Atomkernen übertragen Energie von den Strahlenbündeln auf die Reste des sterbenden Sterns. Rund um die Jets entsteht eine extrem heiße Wolke, die nun ebenfalls ins Freie vorstößt.

Simulationen zufolge vermag der Kokon Sternhülle selbst dann zu durchdringen, wenn den Jets auf dem Weg zur Oberfläche die Puste ausgeht. Das wäre die Erklärung dafür, dass nur manche Hypernovae einen Gammastrahlenausbruch hervorbringen: Erst wenn die Jets mit sehr viel Energie versorgt werden, können sie durch die Sternhülle brechen und ihren Weg ins Weltall in Form stark fokussierter Gammastrahlung fortsetzen. Sonst schafft es bloß der deutlich breitere und diffusere Kokon ins Freie, der weniger intensiv strahlt.

Stimmt die Theorie, dann sollten Astronomen die Kokons bei einer deutlich größeren Zahl von leuchtkräftigen Supernovae beobachten als Jets und Gammastrahlenausbrüche. Allerdings lässt sich bei Sternexplosionen, bei denen es ein GRB zur Erde schafft, das vergleichsweise geringe Leuchten des Kokons nur mit viel Glück erkennen. Der viel energiereichere GRB überstrahlt die zarten Absorptionssignale, die der Kokon dem Lichtspektrum des explodierenden Sterns aufprägen sollte. Und Supernovae ohne GRB werden meist zu spät entdeckt. So zeigen Simulationen von Ehud Nakar und Ore Gottlieb von der Universität von Tel Aviv in Israel, dass die Spuren des Kokons im Spektrum der Supernova wohl bereits ein paar Tage nach Einsetzen der Explosion verblassen.

Das Team um Izzo meint, bei SN 2017iuk nun doppelt Glück gehabt zu haben: Der GRB erlaubte eine rasche Entdeckung der Supernova, war aber eher schwach, so dass er die Beobachtungen nicht zu sehr beeinträchtigte. Wie die Forscher berichten, konnten sie deshalb im Lichtspektrum von SN 2017iuk erstmals Spuren eines Kokons aufspüren.

Demnach entwich das Gammastrahlensignal, das der Swift-Satellit aufgefangen hat, gerade in dem Moment, als die breit gefächerte Gaswolke durch die Sternhülle des sterbenden Sterns brach. Anschließend zeigten sich aussagekräftige Absorptionssignale, die aus Sicht von Izzo und seinen Kollegen durch Kokonmaterial verursacht wurden.

Auch die aus dem Spektrum ersichtliche Expansionsgeschwindigkeit der Materie – 105000 Kilometer pro Sekunde statt der sonst üblichen 40000 bis 50000 – passt zu der Theorie. Das Kokonmaterial expandiert in den Simulationen stets schneller als die normale Supernova-Schockwelle. Dazu kommt das Vorhandensein schwerer Elemente wie Eisen im Lichtspektrum. Sie stammen den Astrophysikern zufolge aus dem Kernbereich des Sterns und gelangen mit dem Kokon an die Oberfläche.

Entscheidend ist die Energiezufuhr aus dem Zentrum

Warum aber erreichen manche Jets die Oberfläche und andere nicht? »Das Schicksal der Jets hängt davon ab, ob die zentrale Energiequelle sie lange genug versorgt«, sagt Ore Gottlieb auf Nachfrage. Die zentrale Energiequelle ist der kollabierende Sternkern und dessen Magnetfeld. Was »lange genug« bedeute, liege wiederum an den spezifischen Eigenschaften des Sterns und der Jets, führt Gottlieb weiter aus.

Wenn die Jets etwa vergleichsweise wenig Energie mit sich führten, einen großen Öffnungswinkel hätten oder aus einem besonders massereichen Stern hervorgingen, benötigten sie mehr Zeit, um die Sternhülle zu durchdringen. »Sie müssen dann entsprechend länger mit Energie versorgt werden, damit diese ungünstigen Ausgangsbedingungen kompensiert werden.« Geschehe das nicht, breche die Energiezufuhr ab, bevor die Jets fast Lichtgeschwindigkeit erreicht haben – in diesem Fall ersticken sie gewissermaßen innerhalb des Sterns und dringen nicht ins umliegende Weltall vor.

Wird also jede Kernkollaps-Supernova von Jets begleitet, die es jedoch

oft einfach nicht ins Freie schaffen? Das sei keineswegs sicher, kommentiert der Supernova-Experte Hans-Thomas Janka vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, der nicht an der Studie beteiligt war: »Es könnte auch ein anderer Mechanismus ohne Jets solche Hypernovae ohne GRB verursachen.« Die Entdeckung lasse einen endgültigen Schluss hier einfach noch nicht zu. »Was nach wie vor fehlt, ist der eindeutige Nachweis von ausbrechenden Jet-Kokons ohne Jets.«

Um die Zweifel zu zerstreuen, müssen Astronomen also mehr Kokons bei anderen Supernovae untersuchen, speziell bei solchen, die definitiv keinen GRB und damit keine ausbrechenden Jets zeigen. Die derzeit geplante und teilweise in Bau befindliche Generation großer Teleskope mit weitem Gesichtsfeld wird in einigen Jahren den Himmel großflächig nach Supernovae absuchen.

Viele Sternexplosionen dürften dann innerhalb weniger Stunden nach ihrem erstmaligen Aufleuchten erfasst werden. Das ist schnell genug, um nach den flüchtigen Anzeichen ihrer Kokons zu suchen.

Auch bei einem anderen seltenen Himmelsphänomen, dem Zusammenstoß zweier Neutronensterne, kommt es zu einem Gammastrahlenausbruch. Manche Forscher spekulieren, dass sich bei dem deutlich kürzeren Phänomen ebenfalls ultraheiße Materiewolken bilden könnten. Klarheit werden hier aber erst neue Daten bringen, wie sie Astrophysiker in den kommenden Jahren erwarten. ◂

Jan Hattenbach ist Wissenschaftsjournalist auf La Palma.

QUELLE

Izzo, L. et al.: Signatures of a jet cocoon in early spectra of a supernova associated with a gamma-ray burst. Nature 565, 2019

ZELLBIOLOGIE

NICHT CODIERENDE GENABSCHNITTE REGULIEREN DAS ZELLGESCHEHEN

Gene von komplexen Lebewesen enthalten mit den »Introns« vermeintlich überflüssige Bereiche, welche die Zelle ungenutzt verwirft. Nun gibt es neue Hinweise darauf, dass dieser genetische »Ballast« doch wichtige Funktionen erfüllt.

Die Boten-RNA von Genen enthält häufig Intron-Sequenzen, die der Zellapparat vor der Proteinsynthese entfernt. In Mangelzeiten scheinen sich diese Schnipsel in Zellen anzusammeln und ihnen zu helfen, Nährstoffarmut zu überstehen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH EDWARDS, S.R., JOHNSON, T.L.: INTRON RNA SEQUENCES PROMOTE CELL SURVIVAL. NATURE 565, 2019, FIG. 1

Wenn der Zellapparat von Eukaryoten (Organismen mit Zellkern) ein Gen in ein Protein übersetzt, fertigt er zunächst eine Abschrift davon an, die Boten-RNA. Diese nutzt er dann als Bauanleitung für das Protein – aber oft erst, nachdem er mehrere Abschnitte daraus entfernt hat. Jene »nicht codierenden« Abschnitte, die so genannten Introns, scheinen somit auf den ersten Blick überflüssiger Ballast zu sein, den die Zelle ungenutzt über Bord wirft. Dauerhafte Verschwendung setzt sich in der biologischen Evolution allerdings eher selten durch, daher suchen Genetiker schon seit Langem nach Gründen dafür, warum die vermeintlich überflüssigen Introns bei Lebewesen mit Zellkernen stets zu finden sind.

Es gibt verschiedene Erklärungsversuche hierzu. Manche sehen in den Introns funktionslos gewordenen, älteren genetischen Code, den die Zelle mitschleppt, ohne groß davon beeinträchtigt zu werden. Andere nehmen an, es handle sich um Überbleibsel von Viren, die sich vor langer Zeit ins Erbgut eingebaut haben. Einige Forscher vermuten, die Introns hätten eine wichtige Regulierungsfunktion für das »Spleißen«, also das Reifen der Boten-RNA in der Zelle, bei dem die Introns entfernt werden. Andere diskutieren, ob die nicht codierenden Abschnitte möglicherweise Einfluss darauf nehmen, wie viel Protein eine Zelle herstellt oder wie schnell und effektiv die Boten-RNA in der Zelle transportiert wird.

Nützliche Hefezellen

Eine neue Hypothese stellen nun zwei Forschergruppen gemeinsam in Beiträgen in der Fachzeitschrift »Nature« vor: Demnach spielen Introns womöglich eine bislang übersehene, regulierende Rolle in Zeiten, in denen es der Zelle an Nährstoffen mangelt.

Wissenschaftler um Sherif Abou Elela von der kanadischen University of Sherbrooke haben Belege für diese Aufgabe von Introns nach zehn Jahren mühevoller Laborarbeit gesammelt. Ihr Untersuchungsobjekt waren dabei Zellen der Hefe *Saccharomyces cerevisiae*, die im Labor über viele Generationen hinweg problemlos zu kultivieren und einfach zu untersuchen sind. Vor allem aber hat die Hefe ein gut erforschtes Genom mit rund 6000 Genen, in dem die Forscher gerade einmal 295 eher kurze Introns zählen, die sich auf 280 für Proteine codierende Gene verteilen.

Diese Überschaubarkeit nutzte Abou Elelas Team aus: Die Forscher erzeugten rund 300 unterschiedliche Hefevarianten, indem sie aus deren Erbgut mit gentechnischen Methoden jeweils ein oder zwei bestimmte Introns herausschnitten. Dann testeten die Wissenschaftler unter verschiedenen Bedingungen, ob der herbeigeführte Intron-Verlust den Zellen zum Nachteil gereichte oder nicht. »Alle haben uns ausgelacht – die dachten, wir spinnen«, erinnert sich Abou Elela

an die Reaktionen von Kollegen auf diese enorme Fleißarbeit.

Tatsächlich hatte der Verlust von ein oder zwei Introns so gut wie nie Folgen, solange ausreichend Energie zur Verfügung stand. Sämtliche modifizierten Hefevarianten – bis auf fünf Sonderfälle – wuchsen in nährstoffreichem Medium genauso gut wie ihre unveränderten Artgenossen. Deutliche Unterschiede zeigten sich hingegen unter Mangelbedingungen: War das Nährstoffangebot gering, gingen 64 Prozent der Hefestämme mit entfernten Introns schneller ein als die Zellen des unveränderten Wildtyps. Weitere Versuche belegten, dass das offenbar mit den normalerweise aus der Boten-RNA herausgeschnittenen Introns zu tun hat: Diese frei gewordenen Genschnipsel scheinen eine bisher übersehene Wirkung darauf zu haben, wie aktiv der Proteinsyntheseapparat ist.

Verhängnisvolle Verschwendung

Das hat in Mangelzeiten gravierende Folgen. Bei Wildtyp-Hefen steigt die Menge an Intron-Schnipseln in der Zelle an, sobald das Nährstoffangebot schwindet. Parallel dazu reduzieren die Gene der ribosomalen Proteine ihre Aktivität, und die Ribosomen, die »Proteinfabriken« der Zelle, arbeiten nur noch auf Sparflamme. Anders bei den veränderten Hefestämmen, denen Introns aus dem Erbgut entfernt wurden: Bei diesen laufen die Ribosomen weiterhin auf Hochtouren – und verbrauchen wertvolle Ressourcen.

Das Energiesparprogramm in Mangelzeiten wird offenbar unter Mitwirkung der Intron-Sequenzen gestartet, folgern die Wissenschaftler. Die nicht codierenden DNA-Abschnitte unterdrücken demnach die Produktion ribosomaler Proteine, was den Ribosomen-Apparat hemmt und ihn langsamer arbeiten lässt. Sie scheinen auch der Herstellung von reifer, funktionstüchtiger Boten-RNA entgegenzuwirken, so dass weniger davon in den Proteinfabriken ankommt. Fehlen Introns, so wie bei den veränderten Hefestämmen, dann gerät dieser Regulationsmechanismus augenscheinlich aus der Balance – die Ribosomen sind dann weiter hochaktiv und bringen die Zelle dazu, trotz mangelnden Nährstoffangebots großzügig mit ihren Ressourcen umzugehen. Welche Introns genau fehlen, scheint dabei unerheblich, erklärt Abou Elela: »70 bis 80 Prozent aller Introns haben denselben Effekt.«

Das zweite Forscherteam hat Ergebnisse präsentiert, die gut zu den Befunden von Abou Elela und seinen Kollegen passen. Auch die Wissenschaftler um Jeffrey Morgan vom Massachusetts Institute of Technology testeten die Belastungsgrenzen von Hefezellen unter Hungerstress – und stellten fest, dass Zellen, denen Introns aus dem Erbgut herausgeschnitten werden, mit Mangelsituationen nicht so gut zurechtkommen.

Den Ergebnissen von Morgan und seinem Team zufolge ist in Zellen unter ausreichender Nährstoffversorgung der Wachstumsregulator TORC1 aktiv, der unter anderem die Produktion weiterer Ribosomen anregt. Zudem scheint TORC1 in aktivem Zustand den Abbau von aus der Boten-RNA herausgeschnittenen Introns zu fördern: Nachdem Morgans Team ihn blockiert hatte, sammelten sich in der Zelle mehr Intron-Schnipsel an. Auch in Mangelzeiten ist die Aktivität von TORC1 normalerweise gebremst – und demzufolge reichern sich Intron-Stücke in der Zelle an. Fehlen diese jedoch, weil sie bereits aus dem Erbgut herausgeschnitten worden sind, läuft TORC1 weiter auf Hochtouren, und die Wachstumsrate der Zellen bleibt hoch.

Auch Morgan und seine Kollegen sind deshalb davon überzeugt, dass Introns eine wichtige Funktion in Zellprozessen übernehmen: Sie hemmen wenn nötig die energieintensive Ribosomenaktivität, und sie werden daran von Gegenspielern wie TORC1 gehindert, sobald die Versorgungslage wieder besser geworden ist.

Weitere Experimente müssen nun klären, ob eine solche postulierte Intron-Funktion nur bei Hefezellen vorkommt oder womöglich bei allen Zellen im Pilz-, Tier- und Pflanzenreich. ◂

Jan Osterkamp ist Redakteur bei »Spektrum.de«.

QUELLEN

Morgan, J.T. et al.: Excised linear introns regulate growth in yeast. Nature 565, 2019

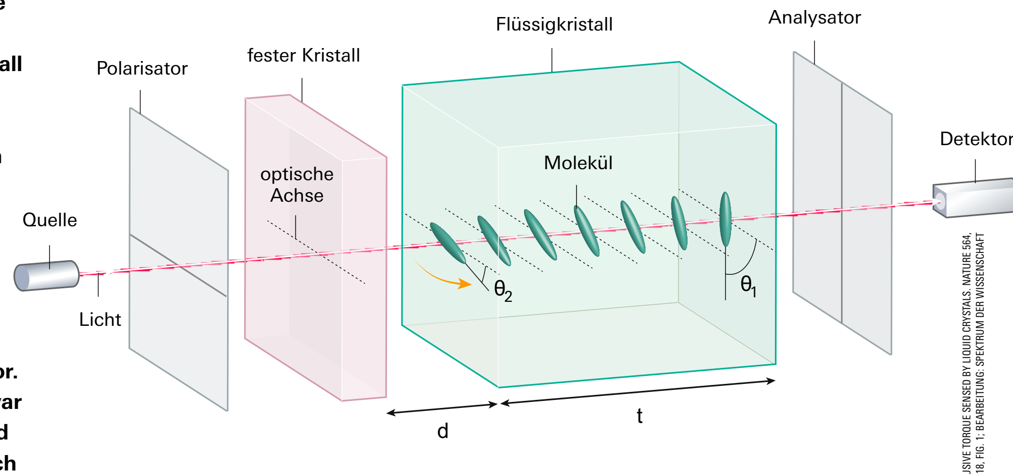
Parenteau, J. et al.: Introns are mediators of cell response to starvation. Nature 565, 2019

MATERIALWISSENSCHAFT
FLÜSSIGKRISTALLE ENTHÜLLEN QUANTEN-DREHMOMENT

Eine seit mehreren Jahrzehnten gehegte Vermutung haben Forscher nun im Experiment mit Flüssigkristallen bestätigt: Quantenphysikalische Schwankungen können eine mechanische Drehung hervorrufen, das so genannte Casimir-Drehmoment.

▸ Nach den Regeln der Quantenphysik ist selbst der leere Raum von schwankenden elektromagnetischen Feldern erfüllt. Das demonstriert ein als Casimir-Effekt bezeichnetes Phänomen, bei dem zwei Metallplatten nahe beieinander positioniert sind. In dem Raum zwischen ihnen sind andere Quantenfluktuationen möglich als außerhalb, und dadurch entsteht eine Kraft, welche die Platten verschiebt. 1972 haben Theoretiker außerdem vorhergesagt, dass die Fluktuationen unter Umständen ebenso einen Dreheffekt erzeugen könnten, also ein Drehmoment. Das wäre in »optisch anisotropen« Materialien der Fall. Deren optische Eigenschaften hängen von der Richtung eines hindurchlaufenden Lichtstrahls ab. For-

Ein fester Kristall kann die mittlere Ausrichtung (θ_1) der Moleküle in einem »nematischen« Flüssigkristall auf Grund quantenmechanischer Effekte verdrehen (zu θ_2, oranger Pfeil). Um dies zu messen, leiteten die Forscher Licht von einer Quelle zuerst durch einen Polarisator, der die Schwingungsebene des Lichts festlegt, dann durch die beiden Kristalle und zuletzt durch einen zweiten Polarisator, den Analysator. Die Dicke (t) des Flüssigkristalls war viel größer als sowohl der Abstand (d) zwischen den Kristallen als auch die Wellenlänge des Lichts. Entlang der optischen Achse des festen Kristalls ist die Geschwindigkeit der Lichtausbreitung unabhängig von der Polarisation des Lichts. Die Forscher bestimmten θ_2 aus der Intensität am Detektor. Der Wert lieferte ihnen zusammen mit den bekannten elastischen Eigenschaften des Flüssigkristalls das Drehmoment.



ZUMER, S.: ELUSIVE TORQUE SENSED BY LIQUID CRYSTALS. NATURE 564, 2018, FIG. 1; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

scher um David Somers von der University of Maryland haben dieses Casimir-Drehmoment nun mit Hilfe von Flüssigkristallen nachgewiesen. Die Entdeckung könnte bei der Entwicklung komplexer mechanischer Geräte im Mikro- und Nanometerbereich helfen.

Ursprünglich hat der Niederländer Hendrik Casimir 1948 den Effekt für zwei ideale Metallplatten theoretisch vorhergesagt. In den 1950er Jahren haben Physiker das Konzept auf reale Materialien übertragen, etwa auf konventionelle Metalle und als Dielektrika bezeichnete elektrische Isolatoren. Die Erklärung für den Casimir-Effekt basiert auf der Anzahl der möglichen Quanten- und Temperaturfluktuationen zwischen den Materia-

lien. Innerhalb der Grenzen können weniger Schwankungen auftreten als außerhalb, daher entsteht netto eine geringe Kraft. Diese ist maximal anziehend, wenn die begrenzenden Objekte identisch sind, und wird kleiner – oder kann sogar abstoßend wirken –, wenn sich die Barrieren in ihren elektrischen Eigenschaften oder ihrer Form unterscheiden.

Doch die Casimir-Kraft ist extrem schwach, und die Präparation und Vermessung passender Grenzflächen erwies sich als anspruchsvoll. Es dauerte fast 50 Jahre bis zur ersten belastbaren experimentellen Bestätigung des Casimir-Effekts 1997. Unterdessen wurde deutlich, dass sich das Konzept von Wechselwirkungen infolge eingeschränkter elektromagnetischer Fluktuationen auf verschiedene Bereiche der Physik verallgemeinern lässt, in denen sich Felder ebenfalls nur in beschränkten Bereichen ausbreiten. Beispiele dafür sind Schallwellen oder so genannte Kapillarwellen entlang von Flüssigkeitsoberflächen. Die Phänomene könnten sogar bei völlig anderen Systemen als der Materialphysik auftreten, etwa bei Gravitationswellen. Casimirähnliche Kräfte sind theoretisch auch bei Flüssigkristallen möglich. Hier kann einerseits die spezielle molekulare Ordnung verschiedener Kristallphasen dazu führen und andererseits insbesondere die Wechselwirkung mit benachbarten Oberflächen.

Aus der Erkenntnis, dass sich mit den Grenzen die daraus resultierende Casimir-Kraft verändert, folgte eine weitere Idee: Eine gebrochene Symmetrie bei den physikalischen Eigenschaften von Oberflächen oder Objekten könnte zu einem Dreheffekt führen. Seit mehr als vier Jahrzehnten gibt es eine Beschreibung für das Casimir-Drehmoment zwischen zwei festen, optisch anisotropen Kristallen, die in unmittelbarer Nähe zueinander liegen. Die Theorie wurde anschließend verbessert und auf komplexere Systeme wie geschichtete Medien ausgedehnt.

Obwohl es viele Ansätze für Experimente gab, gelang es erst jetzt Somers' Team, die Existenz des Casimir-Drehmoments überzeugend nachzuweisen. Der Versuch der Forscher basierte auf der Idee, einen der beiden Festkristalle durch einen Flüssigkristall mit »nematischer« Phase zu ersetzen, in der sich die Moleküle entlang einer Vorzugsrichtung orientieren. Der Flüssigkristall war auf der einen Seite fixiert und lag auf der anderen gegenüber dem festen Kristall, der sich frei drehen konnte (siehe Illustration S. 25). Dem Flüssigkristall fielen zwei Rollen zu: zum einen als optisch anisotropes Material und zum anderen als Drehmomentsensor.

Ein subtiler Effekt für empfindliche Sensoren

Das Casimir-Drehmoment war zwar schwach, dennoch verdrehte es die durchschnittliche Ausrichtung der Moleküle im nematischen Flüssigkristall in Richtung der optischen Achse des Festkörperkristalls. Die Verformung breitete sich über den gesamten Flüssigkristall aus. Die Physiker ermittelten den Grad der Drehung durch deren Einfluss auf die Lichtintensität mit Hilfe zweier Polarisatoren – einen vor und einen hinter den Kristallen. Mit der cleveren Versuchsanordnung bestimmten die Forscher die Abhängigkeit des Casimir-Drehmoments vom Abstand zwischen den Kristallen für vier verschiedene feste Kristalle.

Flüssigkristalle reagieren stark auf schwache äußere elektrische Felder und sonstige Störungen. Deswegen sind sie schon länger die Grundlage vieler Anwendungen, von denen die bekannteste wohl Flüssigkristall-Displays (LCDs) sind. Sie finden sich aber auch in Sensoren. Temperaturfühler etwa basieren seit Jahrzehnten auf der Temperaturempfindlichkeit der Lichtreflexion an so genannten cholesterischen Flüssigkristallen. Etwas neuere chemische Sensoren nutzen die Adsorption von Molekülen (vor allem biologischen) an Flüssigkristalloberflächen. Der Sensor für das Casimir-Drehmoment ist jetzt das neueste Beispiel für ein Messprinzip, das nicht auf herkömmlichen mechanischen Methoden basiert, sondern auf den besonderen Eigenschaften eines Flüssigkristalls.

Eine offene Frage ist, wie groß das gemessene Casimir-Drehmoment werden kann. Nematische Flüssigkristalle werden seit einiger Zeit für Displays und sonstige Anwendungen stetig weiterentwickelt. Vielleicht sind andere Typen von Flüssigkristallen geeigneter, falls sie eine stärkere Kraft erzeugen und sich besser verdrehen lassen als der in dieser Studie verwendete.

Möglicherweise lässt sich der Drehmomentsensor beispielsweise aus einem cholesterischen Flüssigkristall herstellen. Ein solcher hat eine verdrehte innere Struktur und reflektiert selektiv Licht mit zirkularer Polarisation, das sich in die gleiche Richtung dreht. Das Casimir-Drehmoment würde die Ausrichtung der Moleküle des cholesterischen Kristalls verändern und die Lichtreflexion messbar beeinflussen.

Die Beobachtung ist ein wichtiger Beitrag zur Grundlagenphysik mit potenziell weit reichenden Auswirkungen. Die Größe mechanischer und elektromechanischer Geräte unterschreitet inzwischen oft den Mikrometerbereich, wo sich Quantenfluktuationen teilweise deutlich auswirken. Die Entwickler nanoskaliger Systeme müssen Casimir-Kräfte berücksichtigen oder können die Phänomene sogar direkt nutzen.

Ähnliche Effekte sollten in vielen Systemen mit Grenzschichten auftreten, darunter Gase, konventionelle und kritische Flüssigkeiten, kolloidale Dispersionen und Polymere. Sie lassen sich nun auf Grundlage der neuen Experimente näher untersuchen und führen möglicherweise zu praktischen Anwendungen. ◂

Slobodan Žumer ist Professor der Physik an der Universität Ljubljana in Slowenien. Er erforscht Flüssigkristalle am dortigen Jožef-Stefan-Institut.

QUELLE

Somers, D. A. T. et al.: Measurement of the Casimir torque. Nature 564, 2018

nature

www.nature.com
Nature 564, S. 350–351,
20./27. Dezember 2018



SPRINGERS EINWÜRFE
ALIENS SIND ÜBERALL

Weder haben Außerirdische uns kürzlich besucht noch empfangen wir ihre Radiosignale. Heißt das, es gibt sie nicht?

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

spektrum.de/artikel/1626456

Als die Physiker Enrico Fermi und Edward Teller 1950 in Los Alamos über fliegende Untertassen scherzten, spöttelte Fermi: »Where is everybody?« Seither heißt die Frage, warum sich keine Aliens bemerkbar machen, obwohl es im All genügend Zeit und Raum für das mehrfache Entstehen intelligenten Lebens gegeben haben sollte, Fermi-Paradoxon. Darauf sind zwei Antworten möglich: Entweder ist der Vorgang so extrem unwahrscheinlich, dass wir in der Galaxis die Einzigen sind – oder es gibt gute Gründe, warum wir die anderen nicht entdecken.

Die erste Antwort erscheint vielen Forschern immer weniger plausibel, seit das Kepler-Weltraumteleskop bereits in einem sehr kleinen Ausschnitt des Himmels tausende Planeten um ferne Sonnen gefunden hat. Unter den mehreren hundert Milliarden Sternen der Milchstraße bilden Einzelgänger offenbar die Ausnahme. Astronomen schätzen allein die Menge erdähnlicher Planeten in unserer Galaxie auf mehrere Milliarden. Sollte unserer wirklich der einzige sein, auf dem günstige Bedingungen und genügend Zeit für die Entwicklung intelligenten Lebens geherrscht haben? War noch keine andere Zivilisation zu interstellarer Raumfahrt fähig?

Eine neue Lösung des Fermi-Paradoxons suchen Astronomen um Jonathan Carroll-Nellenback von der University of Rochester im US-Bundesstaat New York. Nach ihren Berechnungen vermag sich eine intelligente Spezies unter plausiblen Annahmen im Lauf von Jahrmilliarden durchaus über die gesamte Milchstraße auszubreiten – umso mehr, als die natürlichen Bewegungen der Sterne die Verbreitung auch noch fördern *(arXiv 1902.04450, 2019)*.

Damit stellt sich aber erst recht die Frage, warum wir keine außerirdischen Kontakte erleben. Die Autoren der Studie vermuten, dass die Siedlungstätigkeit der diversen Aliens immer wieder erlahmt. Immerhin ist die interstellare Raumfahrt ungemein aufwändig und Zeit raubend, denn man braucht riesige Schiffe, die vielen aufeinander folgenden Generationen als Habitat dienen – während die Heimat sich möglicherweise unterdessen radikal wandelt und die Expedition buchstäblich vergisst.

Deshalb bilden sich eher nur lokale Zivilisationsblasen, und offenbar liegt die Erde in keiner davon. Gebremst wird die Expansion zusätzlich dadurch, dass ein »habitabler« – lebensfreundlicher – Planet keineswegs auch besiedlungsfreundlich sein muss. Das nennen die Autoren den Aurora-Effekt, nach einem Roman des Sciencefiction-Autors Kim Stanley Robinson: Eine Expedition stößt auf einen belebten Planeten, dessen Organismen die Besucher mit tödlichen Krankheiten infizieren.

Die Wissenschaftler spekulieren, dass im Lauf der langen Erdgeschichte vielleicht sogar Besuche stattfanden, deren Spuren aber durch geologische Prozesse längst verwischt worden sind. Und was schließlich die bislang vergebliche Fahndung nach außerirdischen Radiosignalen im Rahmen der SETI-Projekte (search for extraterrestrial intelligence) angeht, so vergleicht Koautor Jason Wright das mit der Suche nach Delfinen in einem Salzwassertümpel statt im Ozean: Das untersuchte Frequenzband ist einfach viel zu schmal.

So bleibt es zwar äußerst unwahrscheinlich, dass wir demnächst einen Kontakt mit Außerirdischen erleben werden; doch das besagt nicht, dass wir im Universum mutterseelenallein sind. Angesichts der ungeheuren Menge von Planeten und der gewaltigen Zeiträume, die einer Evolution von Leben zur Verfügung stehen, gleicht unsere Milchstraße einem riesigen, dünn besiedelten Archipel, bei dem nur die Lichtgeschwindigkeit dem kulturellen Austausch Grenzen setzt – allerdings fast unüberwindliche.

Der Geschmack des Lebens.

Der außergewöhnliche Stil des Tim Raue im FOCUS.



Lesen Sie hier den ganzen Artikel:
www.menschenimfocus.de

Küchenpirat
größten Namen
internationalen
chszene wurden in
s maledivische
uxusresort „Soneva
ushi“ eingeladen.
Der Berliner Sterne-Koch
Tim Raue ist einer
von ihnen

Ferien für den Gaumen

Nur Urlaub geht für einen Workaholic wie Sterne-Koch **Tim Raue** nicht. Auf den Malediven hat er sich einer ganz eigenen Herausforderung gestellt: Wie kocht man im Paradies?

TEXT VON **LAURA E. EWERT** FOTOS VON **JULIA NEESON**

FOCUS 04/2019

Menschen im



ANTHROPOLOGIE

DIE LETZTE IHRER GATTUNG

Warum hat *Homo sapiens* als einzige Menschenart bis heute überlebt? Ein Erfolgsrezept unserer Spezies lag im Nachwuchs, den wir mit anderen Frühmenschen zeugten.



Kate Wong ist leitende Redakteurin für Evolution und Ökologie bei »Scientific American«.

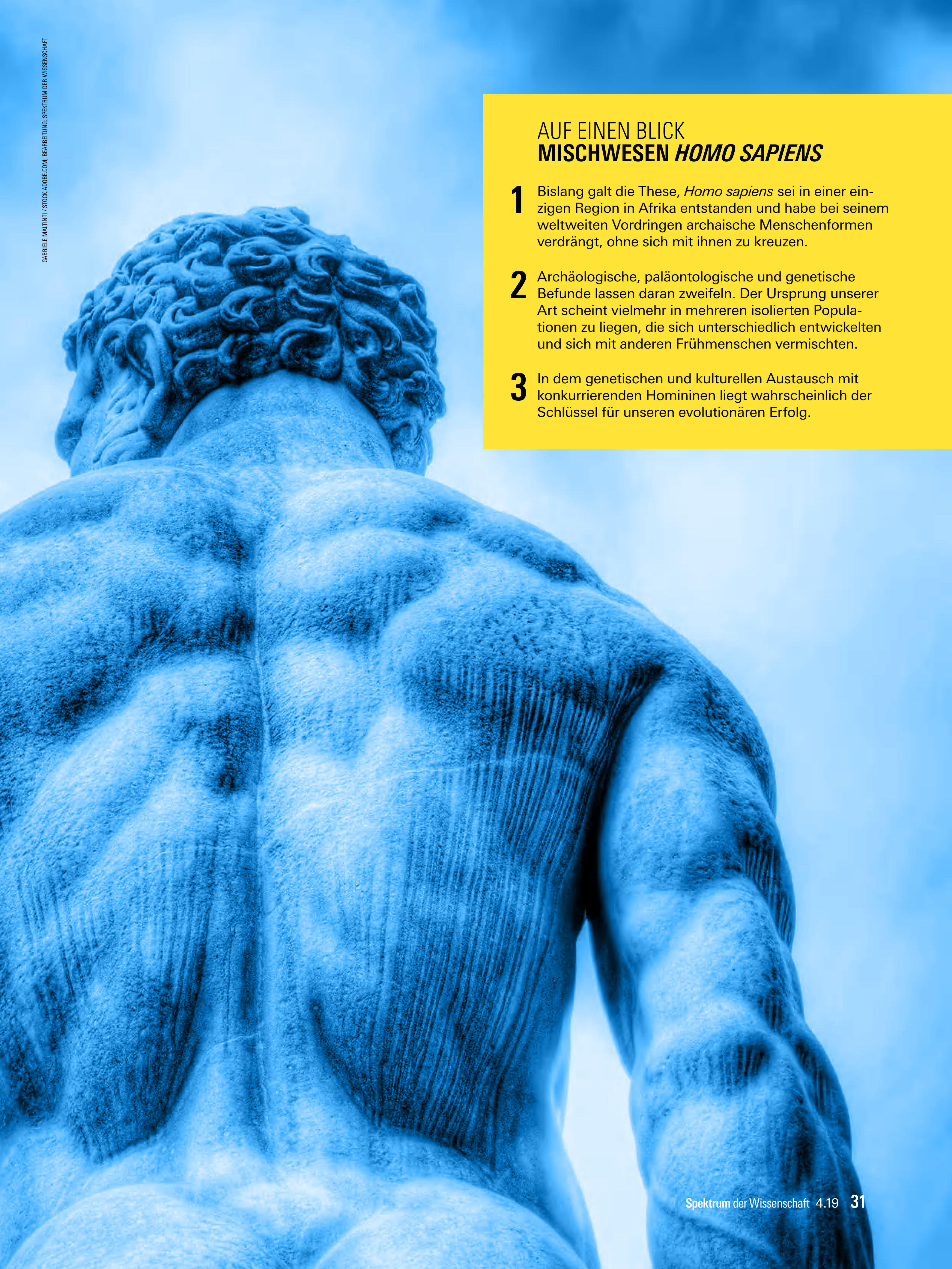
spektrum.de/artikel/1626458



GABRIELE MALTINTI / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SERIE

Was ist der Mensch?



GABRIELE MALTINTI / STOCK.ADOBE.COM; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

AUF EINEN BLICK
MISCHWESEN *HOMO SAPIENS*

1 Bislang galt die These, *Homo sapiens* sei in einer einzigen Region in Afrika entstanden und habe bei seinem weltweiten Vordringen archaische Menschenformen verdrängt, ohne sich mit ihnen zu kreuzen.

2 Archäologische, paläontologische und genetische Befunde lassen daran zweifeln. Der Ursprung unserer Art scheint vielmehr in mehreren isolierten Populationen zu liegen, die sich unterschiedlich entwickelten und sich mit anderen Frühmenschen vermischten.

3 In dem genetischen und kulturellen Austausch mit konkurrierenden Homininen liegt wahrscheinlich der Schlüssel für unseren evolutionären Erfolg.

In der Frühzeit des *Homo sapiens* wurden unsere Vorfahren in eine Welt hineingeboren, die uns heute völlig fremd erschiene – nicht etwa nur wegen des unterschiedlichen Klimas, der anderen Pflanzen und Tiere, sondern wegen der vielen verschiedenen Menschenformen, denen sie vielleicht begegneten. Während des größten Teils der Existenz von *Homo sapiens* wandelten mehrere Menschenspezies über die Erde: In Afrika, wo die Wurzeln unserer Art liegen, streifte auch *Homo heidelbergensis* mit seinem großen Gehirn herum, außerdem *Homo naledi*, dessen Gehirn wesentlich kleiner war. In Asien gab es *Homo erectus* sowie eine rätselhafte Gruppe, die als Denisova-Menschen bezeichnet wird, und später *Homo floresiensis*, ein zwergenhaftes Wesen mit großen Füßen. In Europa und Westasien herrschten stämmige Neandertaler mit dicken Brauenwülsten. Und vermutlich gab es noch weitere Formen, die wir bisher nicht kennen.

Nach derzeitigem Wissensstand war *Homo sapiens* erst vor rund 40 000 Jahren allein – das einzig übrig gebliebene Mitglied einer einstmals unglaublich vielgestaltigen Familie aufrecht gehender Primaten, die zusammenfassend als Homininen bezeichnet werden. Wie kam es, dass unseresgleichen zur letzten Art der Gattung *Homo* wurde?

Bis vor wenigen Jahren hatten Wissenschaftler dafür eine einfache Erklärung: *Homo sapiens* sei erst relativ spät in seiner heutigen Form in einer einzigen Region Afrikas entstanden und hätte sich von dort über die ganze übrige Alte Welt verbreitet. Dabei verdrängte er die Neandertaler und andere archaische Menschenspezies, denen er unterwegs begegnete. Nennenswerte artübergreifende Verbindungen hätte es nicht gegeben, sondern nur den vollständigen Austausch der alten Garde gegen die schlauen Neuankömmlinge, deren Aufstieg offensichtlich nicht aufzuhalten war.

Aber nach neuen Fossilfunden, archäologischen Entdeckungen und genetischen Analysen mussten die Experten dieses Szenario überdenken. Heute sieht es so aus, als wäre *Homo sapiens* weitaus früher entstanden als zuvor geglaubt, und das möglicherweise an mehreren Orten in Afrika. Außerdem entwickelten sich einige seiner charakteristischen Eigenschaften – einschließlich mancher Aspekte des Gehirns – erst Stück für Stück. Darüber hinaus kristallisierte sich heraus, dass sich *Homo sapiens* durchaus mit den anderen Frühmenschen vermischte und dass diese Kreuzungen ein entscheidender Faktor für seinen Erfolg gewesen sein könnten. Insgesamt zeichnen solche Befunde ein weitaus komplizierteres Bild von unseren Ursprüngen, als viele Wissenschaftler es sich vorgestellt hatten – und in diesem Bild spielt schieres Glück für unsere Spezies eine wichtige Rolle.

Die Diskussionen über die Entstehung unserer Art drehten sich traditionell um zwei konkurrierende Modelle. Auf der einen Seite stand die Hypothese des späten afrikanischen Ursprungs (Out of Africa), die insbesondere der Paläoanthropologe Christopher Stringer vertrat: Demnach entstand *Homo sapiens* im Lauf der letzten 200 000 Jahre in Ost- oder Südafrika und verdrängte auf Grund seiner Überlegenheit weltweit die archaischen Homininenarten, ohne sich nennenswert mit ihnen zu kreuzen. Die zweite Theorie war das Modell der multiregionalen Evolution, formuliert von den Paläoanthropologen Milford Wolpoff, Wu Xinzhi und dem 2012 gestorbenen Alan Thorne. Sie unterstellt, *Homo sapiens* habe sich aus Neandertalern und anderen archaischen Menschenpopulationen aus der ganzen Alten Welt entwickelt, die durch Wanderung und Paarung verbunden waren. Nach dieser Vorstellung liegen die Wurzeln des *Homo sapiens* weitaus tiefer und reichen fast zwei Millionen Jahre in die Vergangenheit zurück.

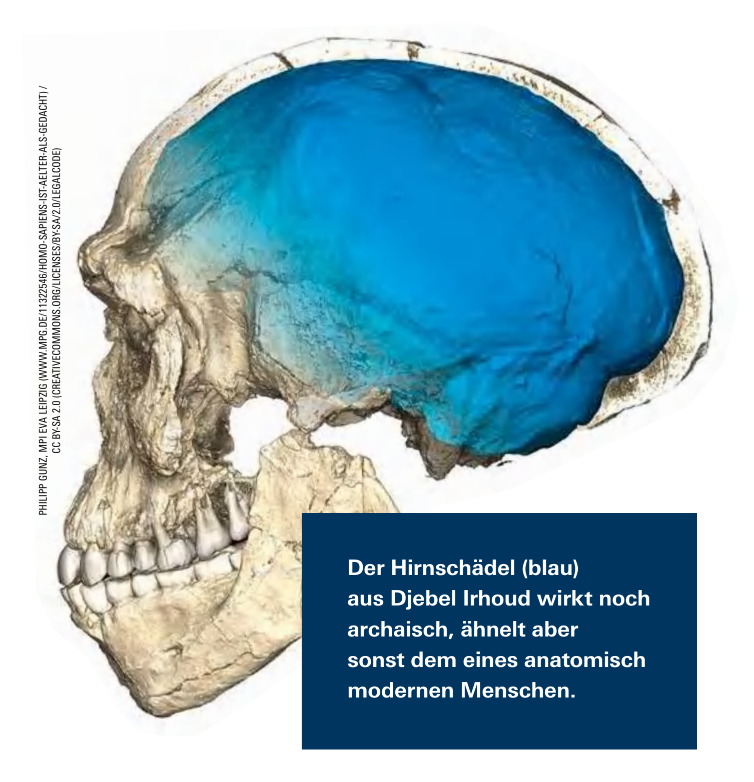
Noch Anfang der 2000er Jahre sprach vieles für das Modell des späten afrikanischen Ursprungs: Analysen der DNA heutiger Menschen deuteten darauf hin, dass unsere Spezies vor nicht mehr als 200 000 Jahren entstanden ist. Die ältesten bekannten Fossilien, die unserer Art zugeschrieben wurden und aus den äthiopischen Fundstätten Omo und Herto stammten, wurden auf ein Alter von 195 000 beziehungsweise 160 000 Jahren datiert. Und Sequenzen der Mitochondrien-DNA (genetisches Material aus den Kraftwerken der Zellen) aus Neandertalerfossilien unterschieden sich von der heutiger Menschen – genau wie man es erwartet, wenn *Homo sapiens* sich nicht mit den verdrängten archaischen Menschen gepaart hatte.

Ausgefeilte Steinwerkzeuge und symbolisches Denken läuten die Mittelsteinzeit ein

Allerdings passen nicht alle Befunde zu dieser Geschichte. Nach Ansicht vieler Archäologen kündigte eine kulturelle Periode, die in Afrika als Mittlere Steinzeit (Middle Stone Age) bezeichnet wird, das Auftauchen von Menschen an, die erstmals dachten wie wir. Vor diesem technischen Wandel stellten die archaischen Menschenarten überall in der Alten Welt mehr oder weniger gleichartige Steinwerkzeuge im so genannten Acheuléen-Stil her. Dabei entstanden klobige Faustkeile, indem man von einem Stein so viele Splitter abschlug, bis er die gewünschte Form hatte. Doch dann machten sich unsere Vorfahren ein neues Verfahren der Werkzeugherstellung zu eigen: Sie drehten den Prozess des Abschlagens um und konzentrierten sich auf die kleinen, scharfen Splitter, die sich von dem Kernstein lösten – eine effizientere Nutzung des Rohstoffs, die aber hochentwickelte Planung voraussetzte. Außerdem befestigten sie die scharfen Splitter an Handgriffen, so dass Speere und andere Wurfgeschosse entstanden. Und manche Menschen stellten jetzt nicht nur mittelsteinzeitliche Werkzeuge her, sondern auch Gegenstände mit symbolischem Wert wie schmückende Perlen aus Muschelschalen oder Farbstoffe zum Malen. Symbolisches Verhalten, zu dem ebenfalls Sprache gehört, gilt wiederum als charakteristisches Kennzeichen des modernen Geistes.

Dabei ergibt sich jedoch ein kleines Problem: Die ersten mittelsteinzeitlichen Werkzeuge wurden auf ein Alter von über 250 000 Jahren datiert – sie tauchten damit lange vor den frühesten Fossilien von *Homo sapiens* auf, die weniger als 200 000 Jahre alt waren. Hatte eine andere Menschenart die Mittelsteinzeit erfunden, oder entwickelte sich *Homo sapiens* in Wirklichkeit viel eher, als es die Fossilfunde nahelegen?

2010 kam ein weiteres Problem hinzu. Genetiker um Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropo-



Der Hirnschädel (blau) aus Djebel Irhoud wirkt noch archaisch, ähnelt aber sonst dem eines anatomisch modernen Menschen.

logie in Leipzig gaben bekannt, sie hätten DNA aus Zellkernen von Neandertalerfossilien gewonnen und sequenziert. Beim Vergleich mit dem genetischen Material von heutigen Menschen stellte sich heraus, dass Nichtafrikaner Neandertaler-Erbgut in sich tragen. Damit war klar: *Homo sapiens* und Neandertaler haben sich eben doch zumindest gelegentlich gepaart.

Weitere Studien an sehr alten Genomen bestätigten, dass Neandertaler und auch andere archaische Populationen zum Genpool der heutigen Menschheit beitrugen. Und im Gegensatz zur Vorstellung, unsere Art sei innerhalb der letzten 200 000 Jahre entstanden, lässt die alte DNA darauf schließen: Neandertaler und *Homo sapiens* spalteten sich bereits beträchtlich früher von ihrem gemeinsamen Vorfahren ab, möglicherweise schon vor mehr als einer halben Million Jahre. Wenn das stimmt, liegt die Entstehung des *Homo sapiens* vielleicht mehr als doppelt so weit zurück, wie es die Fossilien vermuten lassen.

Funde von Djebel Irhoud in Marokko brachten die fossilen, kulturellen und genetischen Anhaltspunkte besser in Einklang – und unterstützten die neuen Ansichten über unsere Ursprünge. Als hier 1961 beim Barytbergbau die ersten Fossilien auftauchten, hielten Anthropologen sie für Neandertalerknochen, die etwa 40 000 Jahre alt seien. Doch durch weitere Ausgrabungen und Analysen in den Folgejahren mussten die Wissenschaftler ihre Haltung immer mehr revidieren. Im Juni 2017 präsentierten der Paläoanthropologe Jean-Jacques Hublin vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie und seine Kollegen neue Fossilien sowie mittelsteinzeitliche Werkzeuge von der Fundstelle. Mit zwei Datierungsverfahren schätzten sie deren Alter auf rund 315 000 Jahre. Damit hatten die Wissenschaftler die bis dato ältesten Spuren des *Homo sapiens* und auch die ältesten Überreste mittelsteinzeitlicher Kultur aufgespürt: So reichen die fossilen Belege für unsere Spezies um mehr als 100 000 Jahre weiter als bisher vermutet in die Vergangenheit zurück und konnten mit dem frühesten belegten Anbruch der Mittelsteinzeit verknüpft werden.

Allerdings teilen nicht alle Fachleute die Ansicht, bei den Fossilien von Djebel Irhoud handele es sich um *Homo sapiens*. Manche glauben, die Funde könnten auch von einem engen Verwandten stammen. Aber wenn Hublin und seine Mitarbeiter mit der Identifizierung der Knochen richtig liegen, entstand die Kombination von Schädelmerkmalen, mit denen man *Homo sapiens* von anderen Menschenarten unterscheidet, nicht parallel mit der Herausbildung unserer Spezies, wie die Anhänger der Theorie des späten afrikanischen Ursprung angenommen hatten. So ähneln die Fossilien mit ihrem kleinen Gesicht anatomisch modernen Menschen. Der Hirnschädel erscheint allerdings verlängert wie bei archaischen Menschenarten und nicht kuppelförmig wie bei uns. In diesen unterschiedlichen Formen spiegeln sich Unterschiede in der Hirnorganisation wider: Im Vergleich zum anatomisch modernen Menschen hatten die Individuen von Djebel Irhoud einen kleineren Scheitellappen, der sensorische Reize verarbeitet, sowie ein kleineres Kleinhirn, das unter anderem an der Sprache und der zwischenmenschlichen Kognition mitwirkt.

Die Artefakte von Djebel Irhoud entsprechen auch nicht vollständig den Merkmalen der Mittelsteinzeit. Die dortigen Menschen stellten Steinwerkzeuge her, um Gazellen, die durch die Graslandschaften der heutigen Wüste streiften, zu jagen und zu zerlegen. Und sie machten Feuer, um vermutlich ihr Essen zu kochen und sich nachts zu wärmen. Aber sie hinterließen keinerlei Spuren symbolischer Ausdrucksfähigkeit.

Damit erscheinen die Menschen von Djebel Irhoud als nicht viel höher entwickelt als der Neandertaler oder *Homo heidelbergensis*. In der Evolutionslotterie würde man kaum auf sie wetten. Der frühe *Homo sapiens* besaß zwar einige Neuerungen, aber »vor 300 000 Jahren gab es keine großen Veränderungen, die auf seinen späteren Erfolg hindeuteten«, meint der Archäologe Michael Petraglia vom Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena. »Am Anfang sah *Homo sapiens* aus wie jedermanns Freiwild.«

Ein gesamtafrikanisches Phänomen

In einem sind sich viele Fachleute einig: Das Gesamtpaket *Homo sapiens* wurde erst irgendwann in der Zeit von vor 100 000 bis vor 40 000 Jahren geschnürt. Wodurch verwandelte sich in den davor liegenden 200 000 Jahren unsere Art von einem gewöhnlichen Homininen zu einem mächtigen Welteroberer? Wissenschaftler versuchen, dafür die Größe und Struktur der Population des frühen *Homo sapiens* heranzuziehen. In einem Beitrag von 2018 vertrat die Archäologin Eleanor Scerri, die inzwischen am Jenaer Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte forscht, zusammen mit zahlreichen Koautoren, zu denen auch Stringer gehörte, ein Modell des afrikanischen Multiregionalismus. Wie die Wissenschaftler betonen, unterscheiden sich die ersten mutmaßlichen Repräsentanten unserer Art – Djebel Irhoud aus Marokko, Herto und Omo Kibish aus Äthiopien sowie der Teilschädel Florisbad aus Südafrika – untereinander wesentlich stärker als heutige Menschen. Die Unterschiede sind so groß, dass manche Forscher sie sogar als verschiedene Arten oder Unterarten interpretieren. »Aber

vielleicht war der frühe *Homo sapiens* auch einfach nur irrwitzig vielgestaltig«, vermutet Scerri. Und möglicherweise, so erklärt sie weiter, sei die Suche nach einem einzigen Ursprung für unsere Spezies, auf die sich viele Wissenschaftler begeben haben, ein fruchtloses Unterfangen.

Nach Ansicht von Scerri und ihren Kollegen stützen die neuesten paläontologischen, archäologischen und genetischen Erkenntnisse immer weniger die These vom einzigen Ursprung des *Homo sapiens*, sondern seine Entstehung entpuppt sich vielmehr als gesamtafrikanisches Phänomen. Statt sich als kleine Population irgendwo in Afrika zu entwickeln, so vermuten die Forscher, kristallisierte sich unsere Spezies aus einer umfangreichen Bevölkerung heraus, die in Grüppchen aufgeteilt war und sich über den ganzen riesigen afrikanischen Kontinent verteilte. Diese Subpopulationen blieben häufig jahrtausendelang durch große Entfernungen und ökologische Schranken wie etwa Wüsten mehr oder weniger isoliert. In solchen Phasen entwickelte jede Gruppe eigene biologische und technische Anpassungen an die jeweilige ökologische Nische, sei es eine trockene Savanne, ein tropischer Regenwald oder die Meeresküste. Hin und wieder jedoch gerieten die Gruppen in Kontakt, was sowohl den genetischen als auch den kulturellen Austausch ermöglichte, der zur Triebkraft für die Evolution unserer Abstammungslinie avancierte.

Das wechselnde Klima könnte die Zersplitterung und erneute Verbindung der Subpopulationen vorangetrieben haben. So zeigen paläoökologische Befunde, dass Afrika ungefähr alle 100000 Jahre in eine feuchte Phase eintrat, in der sich die unwirtliche Saharawüste in eine üppige Weite mit Pflanzen und Seen verwandelte. Diese Episoden der »grünen Sahara« hätten zuvor isolierte Gruppen miteinander verbunden. Als die Sahara dann wieder austrocknete, wurden die Menschen erneut getrennt und konnten in der Zeit bis zur nächsten Grünphase ihre ganz eigenen Evolutionsexperimente durchlaufen.

Jede Gruppe ging ihre eigenen Wege

Eine Population aus Untergruppen, die jeweils an ihre individuellen ökologischen Nischen angepasst sind, erklärt – trotz Verbindung durch gelegentliche Wanderungsbewegungen – nach Ansicht von Scerri und ihren Koautoren nicht nur die mosaikartig erscheinende Anatomie des *Homo sapiens*, sondern auch den Flickenteppich an mittelsteinzeitlichen Artefakten. Im Gegensatz zu den Acheuléen-Werkzeugen, die überall ähnlich aussehen, stößt man bei Stücken aus der Mittelsteinzeit auf beträchtliche regionale Unterschiede. So gibt es in Nordafrika 60000 bis 130000 Jahre alte Werkzeugtypen, die so in Südafrika nicht vorkommen, darunter Steingerätschaften mit charakteristischen Stielen, an denen möglicherweise Handgriffe befestigt waren. Südafrikanische Fundstätten wiederum enthalten – im Gegensatz zu Nordafrika – schlanke, blattförmige Werkzeuge; diese hatte man hergestellt, indem man Steine erhitzte, so dass sich Bruchstücke besser abschlagen ließen. Komplexe Technologien und Symbolverwendung traten im Lauf der Zeit auf dem ganzen Kontinent immer häufiger auf, aber jede Gruppe ging dabei eigene Wege und passte ihre Kultur an die jeweilige Nische an.



Im marokkanischen Djebel Irhoud bergen Wissenschaftler menschliche Überreste und Steinwerkzeuge, die inzwischen als älteste Nachweise des *Homo sapiens* gelten.

Homo sapiens war nicht der einzige Hominine, der ein großes Gehirn und komplexe Verhaltensweisen entwickelte. Wie der Max-Planck-Forscher Hublin feststellte, nahm auch bei schätzungsweise 50000 bis 300000 Jahre alten Fossilien aus China, die nach seiner Vermutung zu den Denisova-Menschen gehörten, die Hirngröße zu. Und die Neandertaler schufen im Lauf ihrer langen Herrschaft ausgefeilte Werkzeuge sowie ihre eigenen symbolischen Ausdrucksformen. Aber solche Verhaltensweisen waren anscheinend weder so hoch entwickelt noch so unverzichtbar für das Überleben, wie sie es später für uns wurden, betont der Archäologe John Shea von der Stony Brook University. Er sieht vor allem in der Sprachfähigkeit des *Homo sapiens* eine Grundlage für dessen Vorherrschaft.

»All diese Gruppen entwickelten sich in die gleiche Richtung«, meint Hublin. »Aber unsere Spezies überschritt in Bezug auf Kognitionsfähigkeit, komplexes Sozialverhalten und Fortpflanzungserfolg früher als die anderen eine Schwelle.« Und als das geschah – nach Hublins Schätzung vor rund 50000 Jahren –, »kochte die Milch über«. Jetzt konnte der in Afrika entstandene und geprägte *Homo sapiens* in praktisch jede Umwelt auf der ganzen Welt vordringen und dort gedeihen. Er war nicht mehr aufzuhalten.

Dass *Homo sapiens* sich über Hunderttausende von Jahren öfters von Mitgliedern seiner eigenen Spezies abspaltete und sich später wieder mit ihnen vereinigte, bescherte ihm vielleicht einen Vorteil gegenüber anderen Angehörigen der Menschenfamilie. Aber das war nicht der einzige Grund für seinen Aufstieg zur Weltherrschaft. Vielmehr sollten wir gerade unseren ausgestorbenen Verwandten dankbar sein für ihre Beiträge zu unserem Erfolg. Die archaischen Menschenformen, auf die *Homo sapiens* bei seinen Wanderungen innerhalb Afrikas und jenseits davon traf, waren nicht

nur Konkurrenten, sondern auch Paarungspartner. Den Beweis liefert das Erbgut heutiger Menschen: Bei Eurasiern macht Neandertaler-DNA zwei Prozent des Genoms aus; die DNA der Denisova-Menschen trägt bis zu fünf Prozent zur DNA der Bewohner Melanesiens bei. Und im März 2018 veröffentlichten Arun Durvasula und Sriram Sankararaman von der University of California in Los Angeles eine vorläufige Studie, wonach sich nahezu acht Prozent des genetischen Erbes der Yoruba-Bevölkerung in Westafrika auf eine noch unbekannte archaische Spezies zurückführen lassen.

Ein Teil der DNA, die *Homo sapiens* von anderen Homininen übernommen hat, dürfte unserer Spezies bei ihrem Weg um den Globus geholfen haben, sich an unbekannte Lebensräume anzupassen. Bei der Analyse von Neandertalersequenzen im Erbgut heutiger Bevölkerungsgruppen stießen der Genetiker Joshua Akey von der Princeton University und seine Kollegen auf 15 Abschnitte, die besonders häufig vorkommen – ein Hinweis auf ihre vorteilhaften Wirkungen. Etwa die Hälfte davon beeinflusst die Immunität. »Als der moderne Mensch sich unter neuen Umweltbedingungen ausbreitete, musste er sich auch mit neuen Krankheitserregern und Viren auseinandersetzen«, erklärt Akey. Durch Paarung »konnte er Anpassungen vom Neandertaler aufnehmen, mit denen sich diese Krankheitserreger besser bekämpfen ließen.«

Wertvolle genetische und kulturelle Gaben von den Konkurrenten

Die andere Hälfte der Neandertalersequenzen, die Akeys Arbeitsgruppe bei heutigen Menschen vergleichsweise häufig fand, betrifft die Haut sowie deren Pigmentierung. Wissenschaftler gehen davon aus, dass *Homo sapiens* sich in seiner afrikanischen Heimat vermutlich mit einer dunklen Hautfarbe vor der schädlichen Ultraviolettstrahlung der Sonne schützte. Auf seinem Weg nach Norden musste er eine hellere Färbung entwickeln, um genügend Vitamin D zu produzieren, das der Körper vorwiegend durch Sonneneinstrahlung gewinnt. Genau dazu könnten die Hautgene des Neandertalers bei unseren Vorfahren beigetragen haben.

Die heutigen Bewohner Tibets wiederum können den Denisova-Menschen für eine Genvariante danken, durch die sie besser mit der sauerstoffarmen Umwelt in den großen Höhen der Tibetischen Hochebene zurechtkommen. Und einige afrikanische Bevölkerungsgruppen haben von einem unbekannten archaischen Vorfahren eine Genversion erhalten, die ihnen wahrscheinlich dabei hilft, schädliche Mundbakterien abzuwehren.

Statt zu warten, bis im eigenen Genpool günstige Mutationen auftauchten, war es wohl für den vordringenden *Homo sapiens* effizienter, sich mit archaischen Menschen zu kreuzen, die sich innerhalb von Jahrtausenden an örtliche Bedingungen angepasst hatten. Andererseits stehen manche Gene, die wir von Neandertalern erhielten, im Verdacht, Depressionen oder andere Krankheiten auszulösen. Vielleicht waren diese Varianten einst von Vorteil und verursachten erst bei unserem modernen Lebensstil Probleme. Oder, so vermutet Akey, das Krankheitsrisiko war ein hinnehmbarer Preis für den erhaltenen Nutzen.

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/menschwerdung**



JOSÉ-MANUEL BENITO ÁLVAREZ / PUBLIC DOMAIN

Von archaischen Menschen erhielten wir nicht nur DNA. Einige Forscher spekulieren, ob der Kontakt zwischen verschiedenen Menschenformen einen kulturellen Austausch ermöglichte und somit Innovationen auslöste. So setzte just in der Zeit, als *Homo sapiens* in das westeuropäische Siedlungsgebiet des Neandertalers eindrang, eine auffällige Blüte technischer und künstlerischer Kreativität ein. Manche Experten vermuteten, die Neandertaler hätten einfach die erfindungsreichen Neuankömmlinge nachgeahmt. Aber möglicherweise sorgte gerade die Wechselbeziehung zwischen beiden Gruppen für eine gegenseitige kulturelle Befruchtung.

Eigentlich sollte uns die Tatsache nicht überraschen, dass sich *Homo sapiens* mit anderen Abstammungslinien der Menschen mischte. »Wir wissen von zahlreichen Tieren, dass Hybridisierung eine wichtige Rolle in der Evolution spielt«, erklärt die Anthropologin Rebecca Rogers Ackermann von der südafrikanischen Universität Kapstadt. »Manchmal entstehen dadurch Populationen und sogar neue Arten, die besser als ihre Vorläufer an eine sich wandelnde Umwelt angepasst sind, weil sie neuartige Merkmale oder Merkmalskombinationen besitzen.« Eine ähnliche Gesetzmäßigkeit zeigt sich auch bei den Vorfahren des Menschen: Durch Kombination entstand die anpassungsfähige, vielgestaltige Art, die wir heute sind. »*Homo sapiens* ist das Produkt eines komplizierten Wechselspiels verschiedener Abstammungslinien«, meint Ackermann. Die Spezies sei gerade deshalb so aufgeblüht, weil daraus so viele Variationen hervorgegangen sind. »Ohne sie wären wir bei Weitem nicht so erfolgreich gewesen.«

Wie oft eine solche Vermischung stattfand und in welchem Ausmaß sie die Evolution des *Homo sapiens* und anderer Homininen vorantrieb, bleibt bislang ungeklärt. Möglicherweise lieferten die ökologischen und demografischen Gegebenheiten, denen unsere Art in Afrika und anderswo ausgesetzt war, für sie mehr Gelegenheiten zu genetischem und kulturellem Austausch mit anderen Gruppen als für unsere Hominidenverwandten. Anders gesagt: Wir hatten einfach Glück. ◂

QUELLEN

Ackermann, R.R. et al.: The hybrid origin of »modern« humans. Evolutionary Biology 43, 2016

Hublin, J.-J. et al.: New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of *Homo sapiens*. Nature 546, 2017

Scerri, E.M.L. et al.: Did our species evolve in subdivided populations across Africa, and why does it matter? Trends in Ecology & Evolution 33, 2018

ANATOMIE

UNTERSCHIEDLICH VERDRAHTET

Die Evolution bescherte dem Menschen ein außergewöhnliches Gehirn. Insbesondere seine für Kognition und Sprache zuständigen Areale sind massiv ausgeweitet.



Chet C. Sherwood ist Professor für Anthropologie an der George Washington University in Washington (USA). Er erforscht die Evolution des Primatengehirns.

⏩ spektrum.de/artikel/1626460

Unser Gehirn ist etwa dreimal so groß wie das der frühesten nachweisbaren Vorläufer bei den Homininen oder das von heute lebenden Menschenaffen. Mit ungefähr anderthalb Kilogramm entspricht seine Masse zwar nur zirka zwei Prozent des Körpergewichts; es beansprucht aber bei körperlicher Inaktivität mehr als 20 Prozent der gesamten benötigten Energie eines Erwachsenen.

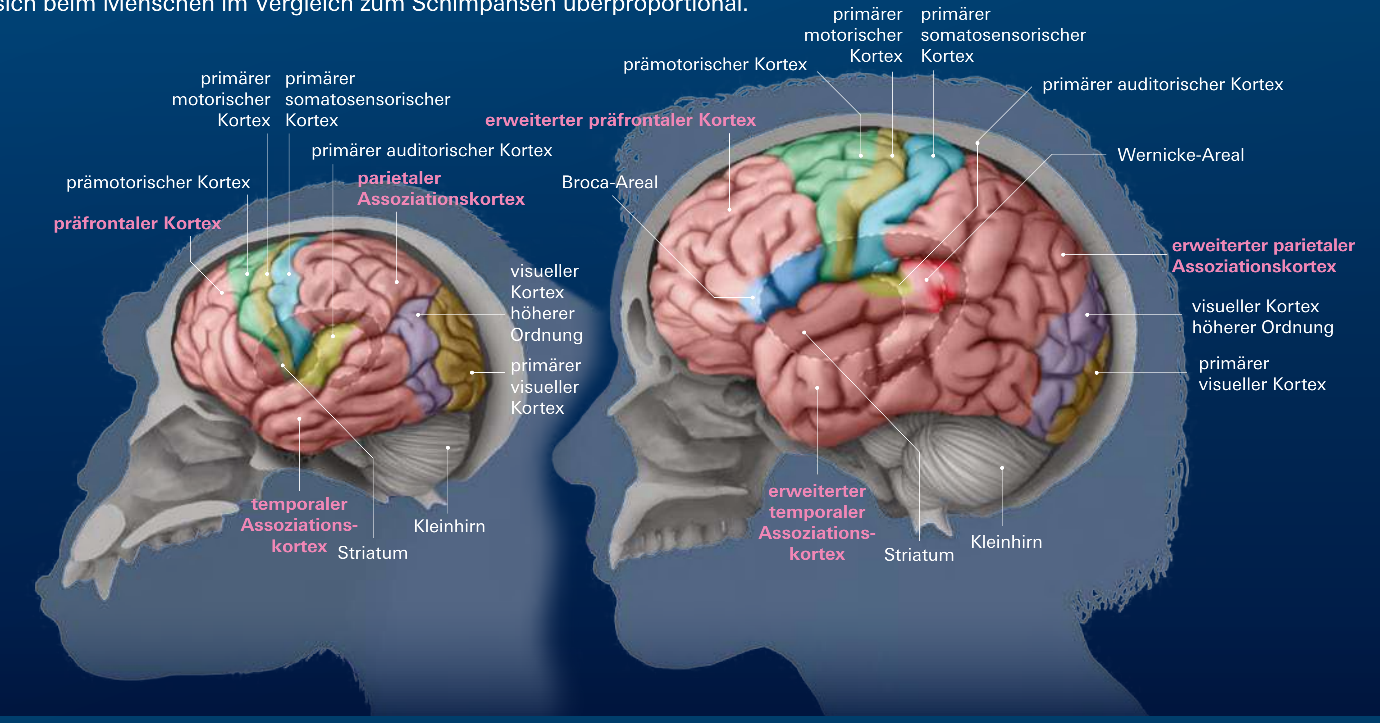
Insbesondere die Teile der Großhirnrinde (Kortex), die an höheren kognitiven Funktionen wie Kreativität oder abstraktem Denken beteiligt sind, haben sich beim Menschen massiv vergrößert. Im Vergleich zu anderen Primatengehirnen sprießen von diesen Assoziationszentren aus wesentlich mehr neuronale Verbindungsstränge zu anderen Großhirnarealen sowie auch zum Kleinhirn, das die Körperbewegungen kontrolliert. Die dadurch geknüpften neuronalen Netzwerke bilden die Grundlage für Sprache, Werkzeuggebrauch und Nachahmung. Auch die auf den Neurotransmitter Dopamin reagierenden subkortikalen – also unterhalb der Großhirnrinde liegenden – Belohnungssysteme wie das Striatum scheinen sich im Lauf der Evolution verändert zu haben. Auf Grund dieser Entwicklung reagiert der Mensch besser auf soziale Signale und lernt leichter sprechen.

Woher stammt unser großes Denkorgan? Fossilfunde deuten darauf hin, dass der Trend zu einem voluminöseren Schädelinhalt vor etwa sechs Millionen Jahren einsetzte. Zu dieser Zeit spaltete sich unsere Linie vom letzten Vorfahren ab, den wir mit heutigen Schimpansen und Bonobos gemeinsam haben. Wissenschaftler gehen davon aus, dass die biologischen Eigenschaften des *Homo sapiens* eng mit seinem großen Gehirn gekoppelt sind – darunter eine verlängerte Kindheit, eine größere Lebensspanne sowie eine Unterstützung der Mütter bei der Versorgung des Nachwuchses durch Väter und Großeltern. Nach der Geburt reift das Gehirn weiter. Dadurch prägen Lebensereignisse im sozialen Umfeld ebenfalls die kognitive Entwicklung.

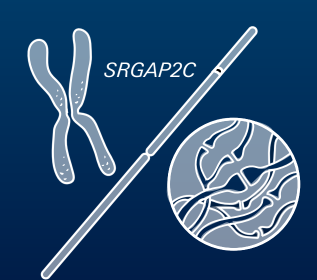
Genetiker und Molekularbiologen konnten weitere Unterschiede des Menschen zu Schimpansen und anderen intelligenten Arten ausmachen. Hier sind die wichtigsten Besonderheiten des menschlichen Gehirns dargestellt.

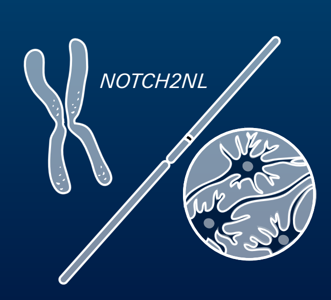
Entwicklung der Hirnzentren

Die für höhere kognitive Funktionen zuständigen Hirnareale – etwa Assoziationszentren im Stirnlappen (Präfrontalkortex), Schläfenlappen (Temporalkortex) und Scheitellappen (Parietalkortex) – vergrößerten sich beim Menschen im Vergleich zum Schimpansen überproportional.





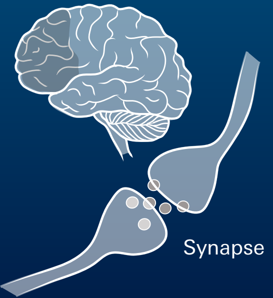


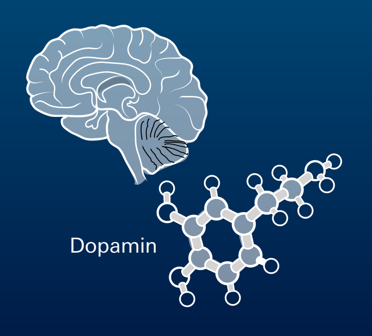


Gene

Beim Menschen auftretende Varianten des Gens *FOXP2* spielen für den Spracherwerb eine Rolle (links). Das menschliche Gen *SRGAP2C* ist als Duplikat von *SRGAP2* entstanden und erhöht die Zahl der neuronalen Verknüpfungen (Mitte). Eine dreifach vorhandene, *NOTCH2NL* genannte menschliche Version des Gens *NOTCH* fördert die Nervenzellproduktion (rechts).





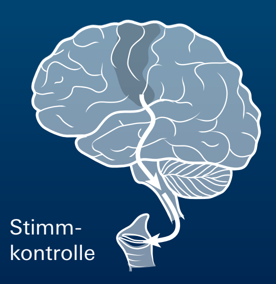


Neurone

Die beim Sozialverhalten mitwirkenden Von-Economo-Neurone sind beim Menschen besonders ausgeprägt (links). In den Synapsen des menschlichen präfrontalen Kortex (Mitte, dunkler Bereich) findet sich im Vergleich zu anderen Primatengehirnen mehr Boten-RNA, die für die Proteinsynthese notwendig ist. Menschliche Hirnzellen des Striatums produzieren mehr Dopamin, das an etlichen kognitiven Funktionen beteiligt ist (rechts).







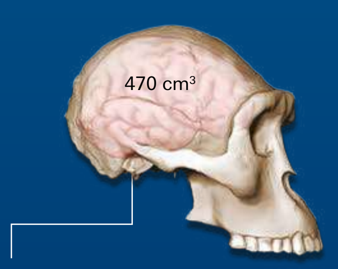
Verschaltungen

Spiegelneurone regen sich, wenn man bei anderen Bewegungen beobachtet. Beim Menschen sind sie komplex verschaltet (links). Verknüpfungen zwischen Broca- und Wernicke-Areal bilden die Grundlage der Sprachverarbeitung (Mitte). Eine Verbindung vom motorischen Kortex zum Hirnstamm, die bei Schimpansen und Makaken fehlt, koordiniert die Kehlkopfmuskulatur (rechts).

MESA SCHUMACHER; ENTWICKLUNG DER HIRNZENTREN NACH SAKAI, T. ET AL.: DEVELOPMENTAL PATTERNS OF CHIMPANZEE CEREBRAL TISSUE PROVIDE IMPORTANT CLUES FOR UNDERSTANDING THE REMARKABLE ENLARGEMENT OF THE HUMAN BRAIN. PROC. R. SOC. B 280, 20122398, 2013 / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

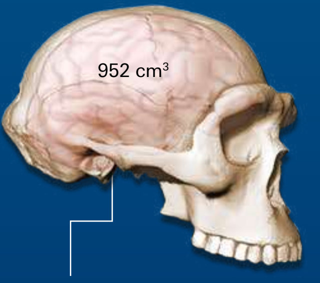
Die Vorläufer unseres großen Gehirns

Der letzte Vorfahre, den der Mensch mit Schimpansen und Bonobos gemeinsam hat, lebte vermutlich vor sechs bis acht Millionen Jahren. Nachdem sich die beiden Linien aufgespalten hatten, entstanden bei bestimmten Homininenarten eine Reihe evolutionärer Anpassungen, darunter aufrechter Gang, Herstellung von Steinwerkzeugen sowie insbesondere ein vergrößertes Gehirn.



Australopithecus africanus war ein Hominine, bei dem menschliche und Affenmerkmale kombiniert auftraten. Mit 470 Kubikzentimetern (cm^3) entsprach sein Hirnvolumen etwa dem heutiger Schimpansen.

vor 3,3 bis 2,1 Millionen Jahren

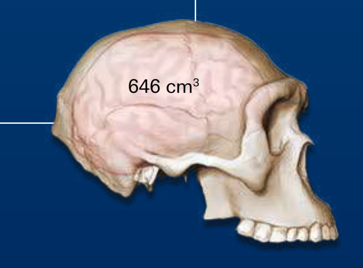


Homo erectus profilierte sich als geschickter Werkzeugmacher, der seine afrikanische Heimat verließ.

vor 1,9 Millionen bis 143 000 Jahren

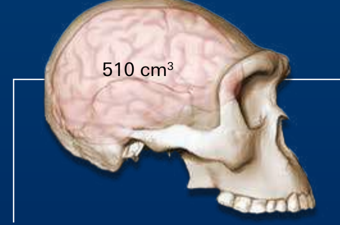
Der Neandertaler teilte sich den Lebensraum mit unserer Spezies. Als versierter Jäger fertigte er Werkzeuge an, und er beherrschte das Feuer. Sein Schädel war etwa so groß wie unserer.

vor 400 000 bis 40 000 Jahren



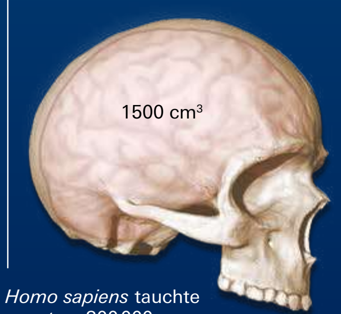
Homo habilis gilt als erste Art der Gattung *Homo*. Sein Gesicht war kleiner als das seiner Vorfahren; im Stirnhirn lagen vermutlich mit Sprache assoziierte Areale.

vor 2,1 bis 1,6 Millionen Jahren



Homo naledi, erst vor wenigen Jahren entdeckt, zeugt mit seinem vergleichsweise winzigen Gehirn von den mitunter verschlungenen Pfaden der Evolution des Menschen.

vor 335 000 bis 236 000Jahren

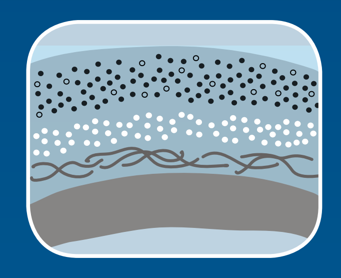


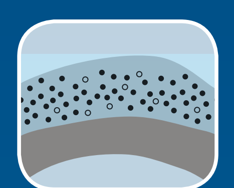
Homo sapiens tauchte vor etwa 300 000 Jahren auf. Typisch ist die kugelige Schädelform, die Raum für das voluminöse Groß- und Kleinhirn bietet.

vor 300 000 Jahren bis heute

Minibrains

Aus Stammzellen lassen sich im Labor Miniaturgehirne züchten. Diese so genannten zerebralen Organoide enthalten Hirnstrukturen, die dem Kortex von Mensch oder Affe ähneln (siehe Querschnittszeichnungen unten). Forscher können damit Genaktivitäten oder die Bildung neuronaler Schaltkreise bei verschiedenen Primatenarten vergleichen, um so herauszufinden, worin die Besonderheit des menschlichen Gehirns liegt.





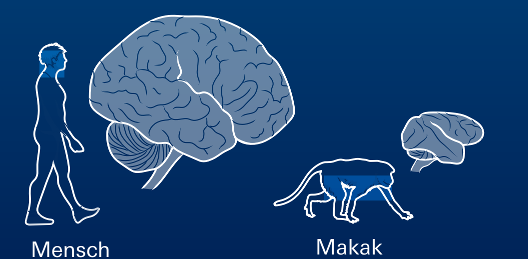
Hirnwachstum

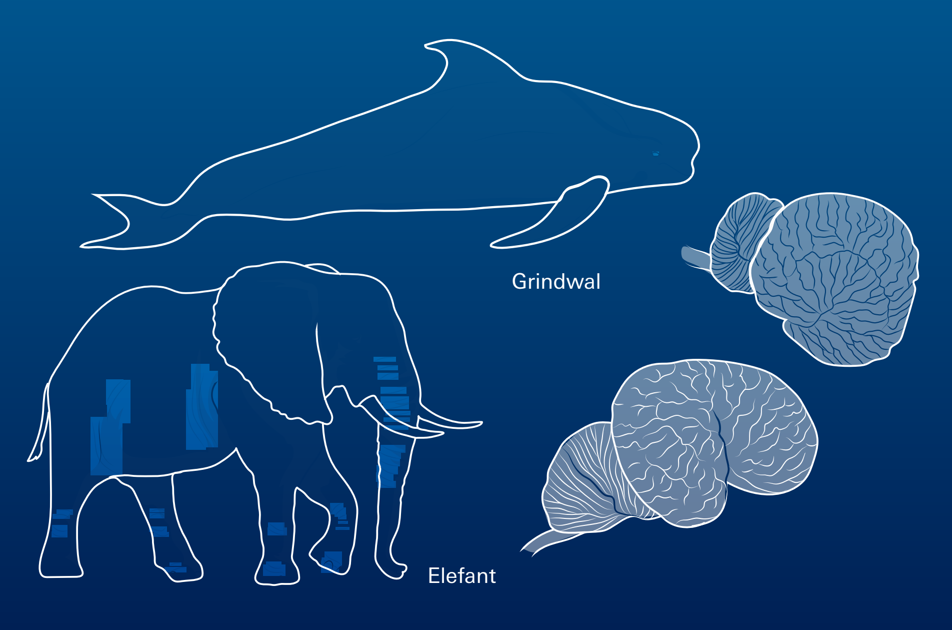
Verglichen mit anderen Primaten kommen menschliche Säuglinge mit einem unterentwickelten Gehirn zur Welt. Im ersten Lebensjahr wächst dieses aber wesentlich schneller und erreicht schließlich ein dreifach größeres Volumen als beim Schimpansen.

MESA SCHUMACHER; VORLÄUFER UNSERES GROSSEN GEHIRNS NACH BOYLE, E.K., WOOD, B.: HUMAN EVOLUTIONARY HISTORY. KAAS, J.H. (HG.): EVOLUTION OF NERVOUS SYSTEMS, 2. AUFL., ACADEMIC PRESS 2017 UND SMITHSONIAN NATIONAL MUSEUM OF NATURAL HISTORY (HUMANORIGINS.SI.EDU) / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Hirn- und Körpergrößen

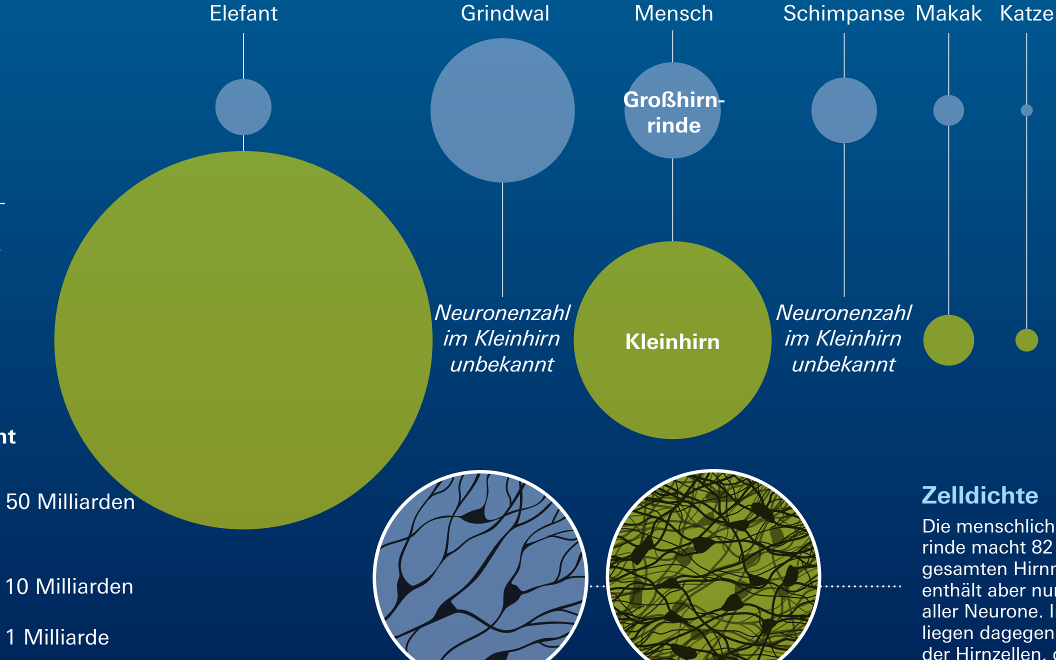
Das menschliche Gehirn ist bis zu achtfach schwerer, als es bei einem Tier mit gleicher Körpermasse zu erwarten wäre – der so genannte Enzephalisationsquotient (EQ) liegt zwischen 7 und 8. Beim Grindwal beträgt der EQ 2 bis 3, beim Elefanten 1 bis 2, beim Makaken 2 und bei der Hauskatze als Bezugsspezies definitionsgemäß 1.





Zellzahl

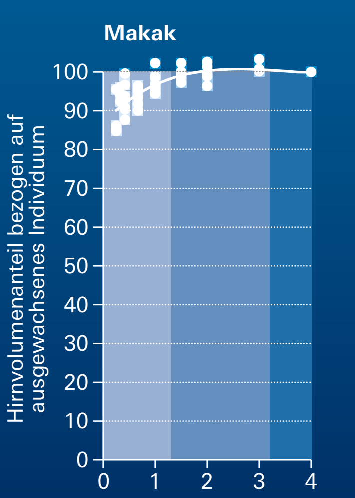
Intelligenz hängt auch mit der Anzahl an Hirnzellen zusammen – und mit dem Ort, wo sie liegen. Mit geschätzt 16 Milliarden hat der Mensch in seiner Großhirnrinde mehr Neurone als fast alle anderen Säugetiere, mit Ausnahme des Grindwals.

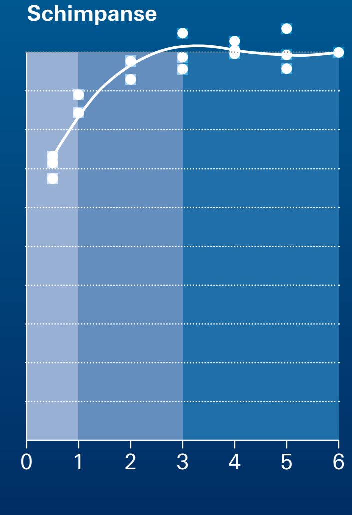


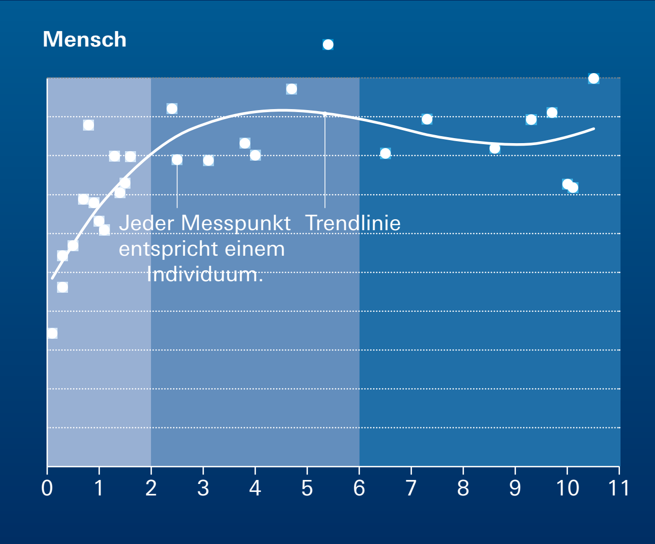


Zelldichte

Die menschliche Großhirnrinde macht 82 Prozent der gesamten Hirnmasse aus, enthält aber nur 19 Prozent aller Neurone. Im Kleinhirn liegen dagegen 80 Prozent der Hirnzellen, die jedoch lediglich einen Massenanteil von 10 Prozent haben.







BIOTECHNOLOGIE

ANTIKÖRPER IN ZELLEN

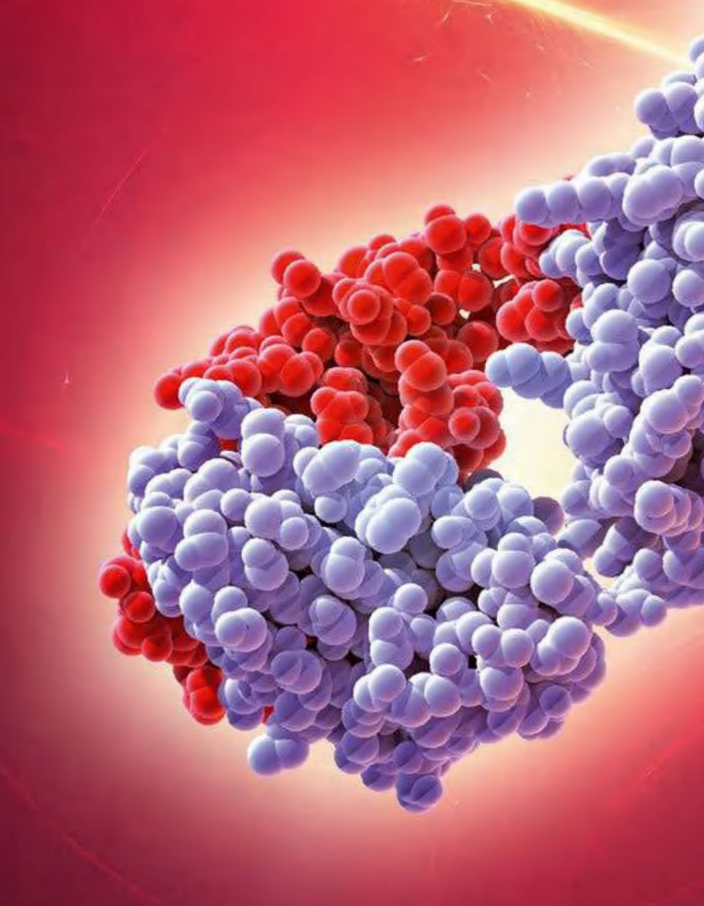
Eiweiße, die im Innern der Zelle an spezifische Proteine binden und deren Funktion blockieren, versprechen neue medizinische Anwendungen.



INGRID PASEMANN

Thomas Böldicke ist Wissenschaftler am Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung und Privatdozent an der Technischen Universität Braunschweig.

spektrum.de/artikel/1626462



ALFRED PASIEKA / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Wenn Forscher ein neues Protein entdecken, wissen sie zunächst meist nicht, welche Funktion es in der Zelle ausübt. Dies lässt sich herausfinden, indem man das Protein inaktiviert und die Folgen davon beobachtet. Solche Untersuchungen sind in der Krebsforschung, Infektiologie, Zellbiologie und Immunologie sehr wichtig. Geht es beispielsweise um die Frage, welche Rolle ein bestimmtes Protein bei Virusinfektionen spielt, schalten die Wissenschaftler dieses Eiweiß aus und analysieren dann, wie sich eine nachfolgende Infektion auswirkt.

Proteine lassen sich auf verschiedene Weise hemmen. Am direktesten geschieht dies mit so genannten Inhibitoren – Substanzen, die an spezifische Stellen der Eiweißmoleküle binden und sie damit lahmlegen. Wenn ein solcher Hemmstoff die Funktion eines Proteins blockt, spricht man von Protein-Knockdown. Als Inhibitoren können unter anderem Aminosäureketten (Peptide) dienen oder auch kürzere DNA- beziehungsweise RNA-Stücke (Oligonukleotide) oder chemische Substanzen.

Alternativ lässt sich die Boten-RNA eines Proteins – eine Abschrift des Gens, die als Bauanleitung dient – zerstören, so dass die Zelle das Eiweiß gar nicht erst herstellt (mRNA-Knockdown, bewerkstelligt mit inhibitorischer RNAi). Auch das Gen des Proteins kann man ausschalten, was Forscher als Knockout bezeichnen. Möglich ist das beispielsweise mit der CRISPR/Cas-Methode (siehe **Spektrum** Oktober 2017, S. 50), bei der bestimmte Enzyme die entsprechende Erbanlage aus dem Genom herausschneiden.

Seit einigen Jahren gibt es ein weiteres sehr erfolgreiches Verfahren, um Proteine in ausgewählten Zielzellen zu inaktivieren. Dabei setzen Forscher intrazelluläre Antikörper

AUF EINEN BLICK
INNENWIRKUNG

1 Indem Forscher bestimmte Proteine im Organismus hemmen, können sie deren Funktion aufklären.

2 Seit einigen Jahren steht hierfür ein neues Verfahren zur Verfügung: die Blockade mit intrazellulären Antikörpern, die im Innern der Zelle wirken.

3 Intrazelluläre Antikörper helfen nicht nur in der Proteinforschung, sondern versprechen auch neue Anwendungen gegen Krebs- und Infektionskrankheiten sowie bei neurodegenerativen Erkrankungen.

Antikörper wie Immunglobulin G (hier ein Computermodell) binden selektiv nur an bestimmte Moleküle. Forscher setzen sie jetzt – als intrazelluläre Antikörper – auch in Zellen ein, um dort ausgewählte Eiweiße zu blockieren.

ALFRED PASIEKA / SCIENCE PHOTO LIBRARY

ein, so genannte Intrabodies. Das sind Eiweiße, die im Innern der Zelle an spezifische Proteine binden und deren Funktion blockieren. Herkömmliche Antikörper können das nicht, da sie nur in extrazellulären Flüssigkeiten vorkommen.

Um einen Intrabody in die jeweils interessierenden Zellen einzubringen, schleusen die Forscher eine Gensequenz in die Zellen hinein, welche die entsprechende Bauanleitung trägt. Der Zellapparat stellt daraus dann das entsprechende Eiweiß her. Mit Hilfe von Signalsequenzen in dem Bauplan lässt sich das Molekül in spezifischen Zellregionen anreichern, etwa im Kern oder in anderen Zellorganellen wie dem endoplasmatischen Retikulum (siehe Grafik unten). Hier können die Intrabodies dann gezielt Proteine hemmen.

Im Prinzip sind Wissenschaftler auch in der Lage, die Intrabodies als fertige Proteine in die Zielzelle einzubringen. Da dieses Verfahren aber noch nicht effizient genug ist, kommt es bisher nur selten zum Einsatz.

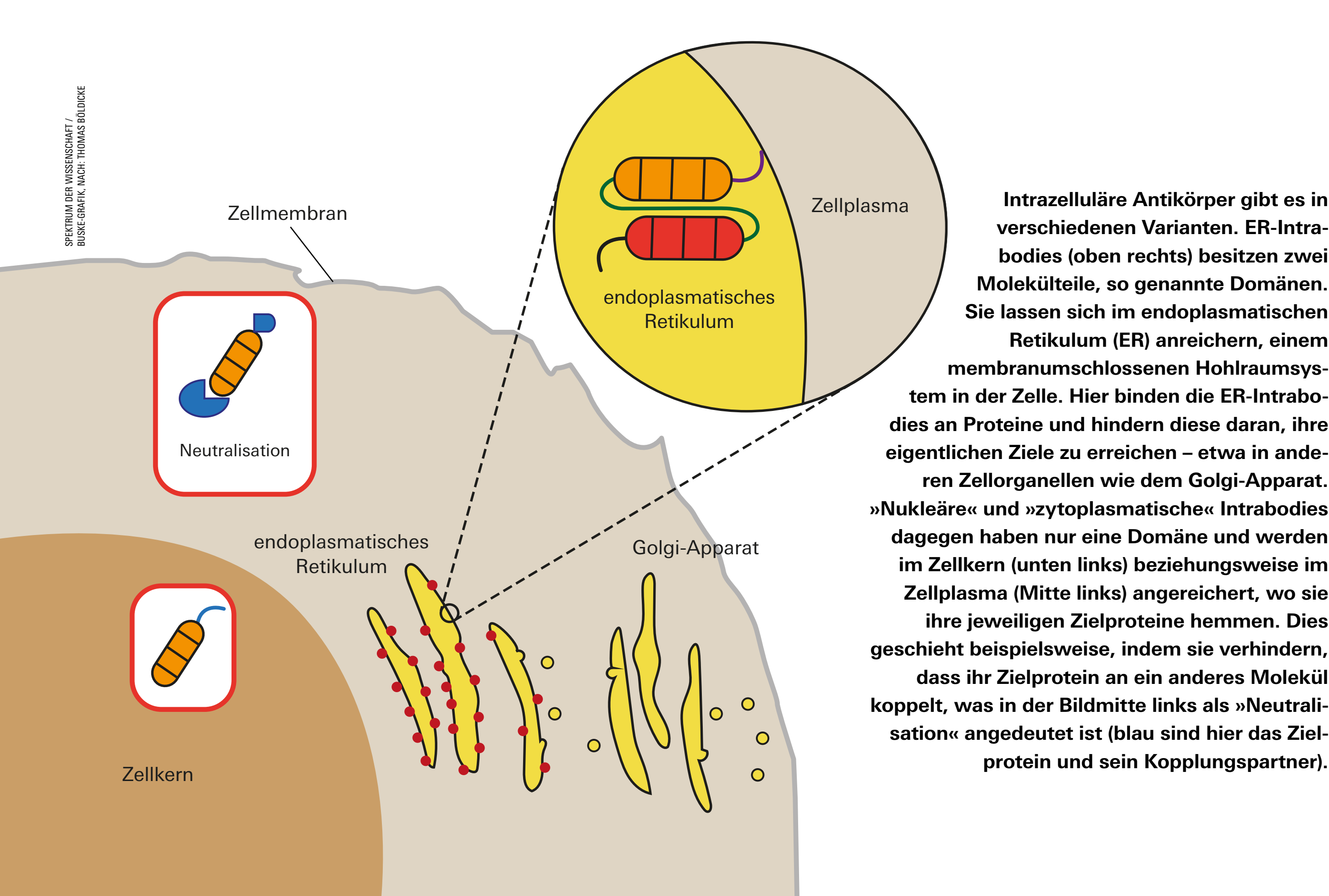
Intrabodies können an Phosphatgruppen von Proteinen binden und so verhindern, dass diese Gruppen mit Enzymen wechselwirken. Das ist mit den etablierten Knockout- und mRNA-Knockdown-Techniken nicht möglich, da diese zwar die weitere Herstellung des interessierenden Proteins unterbinden, sich aber nicht auf die bereits produzierten Moleküle auswirken. Außerdem koppeln die Intrabodies sehr selektiv und gezielt an die jeweiligen Zielproteine. Unspezifische Bindungen an andere als die Zielmoleküle sind von Intrabodies noch nicht berichtet worden.

Es gibt im Wesentlichen zwei Gruppen von intrazellulären Antikörpern. ER-Intrabodies sind benannt nach dem endoplasmatischen Retikulum (ER), dem Transportsystem für Proteine in der Zelle. Sie können Proteine, die durchs ER befördert werden, dort aufhalten. Damit verhindern sie, dass diese Eiweiße an ihren jeweiligen Zielort in der Zelle gelangen und dort ihre vorgesehene Funktion ausüben – zum Beispiel im Golgi-Apparat, im Endosom oder an der Zellmembran. Bei der zweiten Gruppe handelt es sich um so genannte zytosolische oder nukleäre Intrabodies, die im Zellplasma beziehungsweise -kern wirken. Diese hemmen ihr jeweiliges Zielprotein, indem sie es nicht an seinen spezifischen Bindungspartner koppeln lassen oder indem sie seine räumliche Struktur so verändern, dass es nicht mehr richtig gefaltet ist, wodurch es seine Funktion verliert.

Moleküle aus Haien und Kamelen

ER-Intrabodies, die sich etwa aus Mäuseantikörpern gewinnen lassen, bestehen aus zwei Molekülteilen, so genannten Domänen. Jeder davon weist einen Bereich variabler Struktur auf, der sich von einer Antikörpersorte zu anderen unterscheidet. Beide Domänen sorgen zusammen für die spezifische Bindung an das Zielprotein. Im Gegensatz dazu haben zytoplasmatische und nukleäre Intrabodies meist nur eine Domäne; man gewinnt sie oft aus Antikörpern von Kamelen oder Haien.

Um passende Molekülstrukturen zu bekommen, muss man die Tiere – ob Maus, Kamel oder Hai – vorher gegen das Zielmolekül immunisieren, damit ihr Organismus den entsprechenden Antikörper herstellt. Alternativ dazu lassen sich entsprechende Verbindungen auch aus bereits vorhandenen Antikörperbibliotheken des Menschen isolieren. Das letztere Verfahren hat sich in den zurückliegenden Jahren als sehr effizient erwiesen.



Intrazelluläre Antikörper gibt es in verschiedenen Varianten. ER-Intrabodies (oben rechts) besitzen zwei Molekülteile, so genannte Domänen. Sie lassen sich im endoplasmatischen Retikulum (ER) anreichern, einem membranumschlossenen Hohlraumsystem in der Zelle. Hier binden die ER-Intrabodies an Proteine und hindern diese daran, ihre eigentlichen Ziele zu erreichen – etwa in anderen Zellorganellen wie dem Golgi-Apparat. »Nukleäre« und »zytoplasmatische« Intrabodies dagegen haben nur eine Domäne und werden im Zellkern (unten links) beziehungsweise im Zellplasma (Mitte links) angereichert, wo sie ihre jeweiligen Zielproteine hemmen. Dies geschieht beispielsweise, indem sie verhindern, dass ihr Zielprotein an ein anderes Molekül koppelt, was in der Bildmitte links als »Neutralisation« angedeutet ist (blau sind hier das Zielprotein und sein Kopplungspartner).

ER-Intrabodies waren die ersten intrazellulären Antikörper, die erfolgreich an Zellkulturen und Mäusen eingesetzt wurden. Das liegt daran, dass im endoplasmatischen Retikulum wichtige Prozesse der Proteinfaltung stattfinden und die ER-Intrabodies hier die richtige räumliche Struktur einnehmen. Für zytosolische und nukleäre Intrabodies war die Entdeckung ausschlaggebend, dass Antikörper mit nur einer Domäne, die in die Zelle eingeschleust werden, auch im Zellkern und Zellplasma oft korrekt und stabil gefaltet sind – im Gegensatz zu jenen mit zwei Domänen. Deshalb haben Forscher Erstere in den vergangenen Jahren zunehmend eingesetzt. Momentan sind ungefähr genauso viele zytosolische und nukleäre Intrabodies in der Anwendung wie ER-Intrabodies.

Für intrazelluläre Antikörper gibt es ein großes Anwendungsfeld. Wissenschaftler haben damit an Kulturen von Immunzellen, Krebszellen, virusinfizierten Zellen, Nervenzellen und blutgefäßauskleidenden Endothelzellen experimentiert, außerdem an Pflanzen und Taufliegen. Nancy E. Hynes vom Friedrich Miescher Institute for Biomedical Research (Schweiz) und ihre Kollegen haben 2003 mit ER-Intrabodies bestimmte Oberflächenrezeptoren von Krebszellen gehemmt, die Wachstumsfaktoren binden und somit die Tumorbildung fördern. Zudem gelang es, Transkriptionsfaktoren zu inaktivieren, die das Ablesen von Krebsgenen ankurbeln. Einem Team um Stephen Locarnini vom Victorian Infectious Diseases Reference Laboratory in Melbourne (Australien) wiederum ist es 2010 geglückt, in virusinfizierten Zellen den Zusammenbau der infektiösen Partikel und deren Vervielfältigung zu verhindern. Roger J. Pomerantz von der Thomas Jefferson University (Philadelphia, USA) und seine Arbeitsgruppe stoppten mit intrazellulären Antikörpern den Eintritt von Viren in Wirtszellen. Andere Forschern haben mit Intrabodies die Zusammenlagerung jener Proteine in Nervenzellen unterbunden, die bei der Entstehung neurologischer Krankheiten eine große Rolle spielen – etwa der Chorea Huntington oder der Parkinsonkrankheit.

Dem Tumor die Blutzufuhr abschneiden – um ihn auszuhungern

Meine Kollegen und ich haben in den Jahren 2010 und 2013 mit Hilfe von Intrabodies bestimmte Rezeptoren in Makrophagen gehemmt, die beim Entstehen von chronischen Entzündungen und Autoimmunkrankheiten eine wichtige Rolle spielen. Vor Kurzem blockten wir mit anderen Intrabodies intrazelluläre Enzyme in Mäusen, die bei der Metastasierung (Absiedelung von Tochtertumoren) eine Rolle spielen. Zudem haben wir einen Intrabody hergestellt, der sich an einen Rezeptor auf Endothelzellen anheftet. Wie Experimente gezeigt haben, kann er die Neubildung von Blutgefäßen hemmen. Tumoren benötigen ab einer bestimmten Größe einen Zugang zum Blutkreislauf, um an ausreichend Nährstoffe zu kommen, und veranlassen hierzu benachbarte Blutgefäße, in ihre Richtung auszusprossen. Krebsmediziner versuchen, das zu verhindern.

Intrabodies helfen, die biochemischen Funktionen von Proteinen aufzuklären. Jan Gettemans und sein Team von der Universität Ghent (Belgien) haben 2013 beispielsweise mit zwei verschiedenen Intrabodies entdeckt, dass das zelluläre Protein L-Plastin sehr wichtig ist für die Wechselwirkung zwischen einer Zelle und der sie umgebenden extrazellulären Matrix. Wenn die Forscher L-Plastin in Zellen eines Prostatatumors mit Intrabodies hemmten, führte das zu einem verminderten Abbau der Matrix. Infolgedessen hafteten die Zellen stärker aneinander, was ihre Fähigkeit einschränkte, sich aus der Tumormasse zu lösen, in andere Gewebe einzuwandern und dort Tochtertumoren zu bilden.

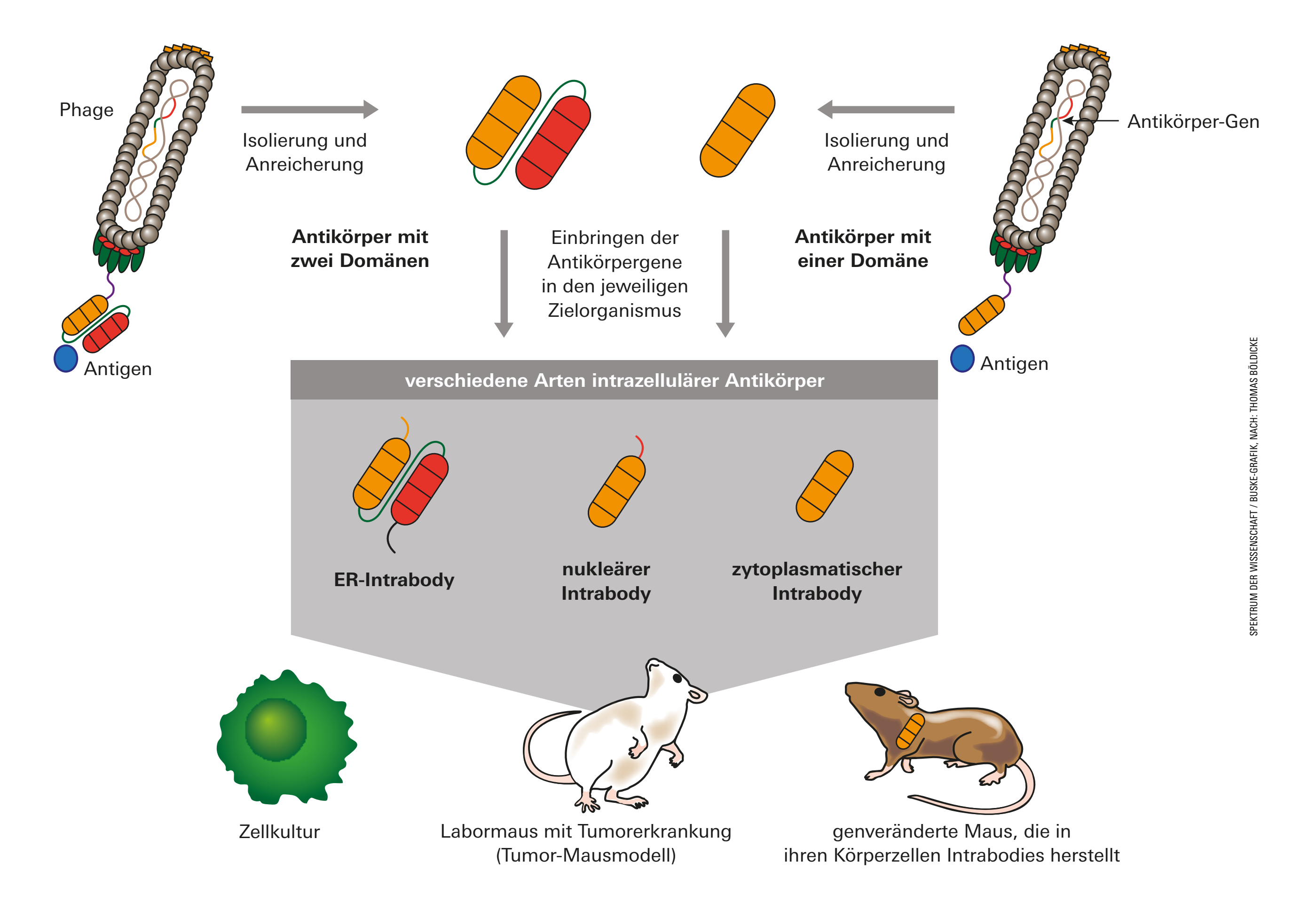
Stefan Dübel von der Technischen Universität Braunschweig und seine Kollegen schließlich haben mit einem ER-Intrabody gegen das Protein Sec61 gezeigt: Dieses Eiweiß spielt eine entscheidende Rolle dabei, dass die T-Lymphozyten des Immunsystems virenbefallene Zellen vernichten können. Eine solche T-Zelle kann körperfremde virale Proteine (Virusantigene) nur dann erkennen und dagegen aktiv werden, wenn die infizierten Zellen sie mit Hilfe des so genannten Hauptgewebeverträglichkeitskomplexes I (MHCI) in Form kleiner Peptide auf ihrer Oberfläche präsentieren. Dies gelingt aber nur unter Mitwirkung von Sec61. Blockierten die Forscher um Dübel dieses Protein mit einem Intrabody, funktionierte die Präsentation der Virusantigene nicht mehr.

Wie sich Proteine ausschalten lassen

Protein-Inhibitoren können ihre Zielmoleküle auf verschiedene Weise lahmlegen. So genannte neutralisierende Inhibitoren verhindern beispielsweise, dass ein bestimmter Stoff an ein Rezeptormolekül koppelt. Infolgedessen bleibt der Rezeptor (beziehungsweise der Signalweg, den er kontrolliert) inaktiv. Andere Inhibitoren verändern, nachdem sie sich an das Zielprotein angelagert haben, dessen räumliche Struktur, so dass es nicht mehr die richtige Faltung besitzt, um seine Funktion auszuüben.

Möglich ist auch, die Boten-RNA eines Proteins aus dem Verkehr zu ziehen, so dass die Zelle das Eiweiß gar nicht erst herstellt. Dies geschieht mit so genannter inhibitorischer RNA, die kurze komplementäre Sequenzen zur jeweils interessierenden RNA enthält, sich deshalb an sie anlagert und deren Abbau bewirkt.

Schließlich lässt sich das Gen des Proteins ausschalten (Knockout). Als Verfahren dafür steht die klassische Genaktivierung mit Hilfe der homologen Rekombination oder auch die CRISPR/Cas-Methode zur Verfügung. Bei der letzten schneiden bestimmte Enzyme die entsprechende Erbanlage aus dem Genom heraus. Der zelluläre Reparaturmechanismus kann dann gegebenenfalls eine vorher eingebrachte inaktive Version des Gens an dieser Stelle ins Erbgut einsetzen.



Intrazelluläre Antikörper herzustellen, ist recht anspruchsvoll. Mit Hilfe von bakterieninfizierenden Viren, so genannten Phagen, und Antigenen (den Gegenstücken der Antikörper) können Forscher den gewünschten Antikörper aus Molekülsammlungen isolieren und in Bakterien anreichern. Anschließend bringen sie das Gen dieses Antikörpers in den jeweils interessierenden Organismus ein, etwa in kultivierte Zellen oder Versuchstiere. Der Organismus stellt den Antikörper dann im Innern seiner Zellen her, wo dieser – als ER-, als zytoplasmatischer oder als nukleärer Antibody – sein jeweiliges Zielprotein hemmt.

In den zurückliegenden Jahren ist es mittels Gentechnik gelungen, Mäuse zu züchten, die Intrabodies in ihren Körperzellen produzieren. Das ist besonders wichtig in solchen Fällen, in denen sich das entsprechende Protein nicht per Knockout-Verfahren hemmen lässt, weil die Tiere daran sterben. Stefan Dübel und seine Kollegen haben eine solche genveränderte Maus gezüchtet, die Intrabodies gegen ein Zelloberflächenprotein produziert, aber dennoch lebensfähig ist. Offenbar liegt das daran, dass der Antikörper das Oberflächenprotein nicht vollständig inaktiviert. Die »Intrabody-Mäuse« legten aber ein anderes Verhalten an den Tag als ihre unveränderten Artgenossen, was Rückschlüsse auf die Funktion dieses Oberflächenproteins erlaubt.

Für die Zukunft fassen die Forscher Intrabody-Mäuse mit anschaltbarer Intrabody-Produktion ins Auge, um das therapeutische Potenzial intrazellulärer Antikörper bei Tumorerkrankungen oder Virusinfektionen zu untersuchen. Zudem lassen sich Intrabodies dazu einsetzen, den Abbau bestimmter Zielproteine zu fördern. Dazu werden sie an eine Untereinheit jenes Enzymkomplexes gekoppelt, der normalerweise die Funktion ausübt, fehlerhaft hergestellte Proteine während des Transports vom endoplasmatischen Retikulum ins Zellplasma mit dem Markerprotein Ubiquitin zu verknüpfen und somit zum »Abriss« freizugeben. Heftet man nun einen Intrabody an diesen Enzymkomplex, zerlegt die Zelle sein Zielprotein. Diese Technik kann die bereits bewährten Verfahren zur Funktionsaufklärung neu entdeckter Proteine (etwa mit CRISPR/Cas oder inhibitorischer RNA) sehr gut ergänzen. Allerdings ist sie bisher nur selten eingesetzt worden.

Einige Intrabodies gegen virale beziehungsweise Krebs erregende Proteine oder gegen Eiweiße des Nervensystems besitzen therapeutisches Potenzial. So schaltet ein HIV-Protein namens Nef (Negative Regulatory Factor) nach einer Infektion mit diesem Virus das Rezeptormolekül CD4 auf der Oberfläche von T-Lymphozyten aus. Infolgedessen können sich neu hergestellte Viruspartikel an der Membran der infizierten Zelle zusammenfügen und anschließend nach außen gelangen. Ein intrazellulärer Antikörper gegen Nef unterband das im Experiment. Daniel Baty und seine Kollegen vom Institut Cochin in Paris haben diesen Intrabody an transgenen Mäusen 2011 getestet, die Nef in ihren Körperzellen produzieren. Bei diesen Nagern entwickeln sich die T-Lymphozyten nicht normal, und die CD4-Produktion ist eingeschränkt. Die zusätzliche Herstellung des

Intrabodys im Organismus der Tiere führte dagegen zu einer normalen T-Zell-Entwicklung und CD4-Produktion. Künftig lässt sich mit dem intrazellulären Antikörper vielleicht auf molekularer Ebene aufklären, wie Nef bei einer HIV-Infektion wirkt. Daraus könnten neue Behandlungsansätze entstehen. Andere Intrabodies gegen das HIV-Protein Vif (Viral infectivity factor, verhindert Mutationen der viralen DNA und deren Abbau) und gegen eine RNA-Polymerase des Hepatitis-C-Virus (die wichtig ist für die Vermehrung der infektiösen Partikel) hemmten in Zellkultur die Ausbreitung der jeweiligen Viren.

Auch gegen das toxische Enzym SpvB des Bakterienstamms *Salmonella typhimurium* und gegen Proteasen von *Clostridium botulinum* sind wirksame intrazelluläre Antikörper hergestellt worden, die in Zellkultur dessen Aktivität deutlich herabsetzten.

Mit intrazelullären Antikörpern gegen unlösliche Proteinklumpen

Bei vielen Erkrankungen spielen fehlerhaft gefaltete Proteine eine Rolle, die sich inner- oder außerhalb von Zellen zusammenlagern. Beispiele dafür sind neurodegenerative Leiden wie Alzheimer, Parkinson und Chorea Huntington, aber auch Proteinfaltungsstörungen wie die Amyloidosen, bei denen sich körpereigene Eiweiße infolge einer Strukturänderung als unlösliche Fäden ablagern.

Gegen einige dieser Eiweiße sind intrazelluläre Antikörper hergestellt worden, die deren Verklumpen in Zellkulturen und in Versuchsmäusen verhindern. Sehr vielversprechend unter ihnen ist ein kürzlich von der Arbeitsgruppe um Jan Gettemans entwickelter Intrabody, der die Entstehung der erblichen und bisher nicht behandelbaren Gelsolin-Amyloidose in Labormäusen wirksam unterbindet. Bei diesem Krankheitsbild spaltet ein Enzym namens Furin das Protein Gelsolin, wobei ein großes Bruchstück entsteht, das anschließend aus der Zelle ausgeschleust und von einer Protease in zwei unterschiedlich große Teile zerlegt wird. Der größere davon lagert sich mit seinesgleichen zu längeren, unlöslichen Fasern zusammen. Der neu entwickelte Intrabody neutralisiert die Aktivität des Furins und der Protease und wirkt damit der Fadenbildung entgegen.

In Labormäusen haben Intrabodys gegen verschiedene krebstypische Proteine dabei geholfen, das Wachstum von Tumorzellen einzudämmen. Zu den Zielproteinen gehörten mutiertes Ras, LMO2 (LIM domain Only 2) und das so genannte F-Actin Capping Protein CapG. Gettemans und seine Arbeitsgruppe haben 2013 menschliche Tumorzellen, die Intrabodies gegen solche Eiweiße herstellten, in Mäuse mit nicht funktionierendem Immunsystem verpflanzt und anschließend das Tumorwachstum beobachtet. Wegen der inaktiven Körperabwehr bilden diese Tiere keine Immunreaktion gegen die Tumorzellen aus, so dass sich der Einfluss der Intrabodies auf das Krebszellwachstum sehr gut untersuchen lässt. In einem anderen Fall schritt die Krebserkrankung deutlich langsamer fort, nachdem die Forscher einen zytosolischen Intrabody als Protein gegen mutiertes Ras injiziert hatten.

Eine therapeutische Anwendung von Intrabodies am Menschen ist allerdings noch nicht in Sicht. Das liegt vor allem daran, dass manche Probleme beim Einschleusen therapeutischer Gene und Proteine in Tumorzellen eines Patienten noch nicht vollständig gelöst sind. Bei einem gängigen Verfahren werden die entsprechenden Erbanlagen (hier das Gen für einen Intrabody) in einem Virus verpackt, das man anschließend die jeweiligen Zellen infizieren lässt. Nach erfolgter Infektion baut das veränderte Virus das entsprechende Gen ins Genom der Zielzelle ein, wo der Zellapparat es abliest.

Eine nichtvirale Technik besteht darin, die Gene in künstlich hergestellte Nanopartikel einzubringen, welche die Zielzelle dann in sich aufnimmt. Mit diesem Verfahren lassen sich auch Proteine einschleusen.

Bei beiden Ansätzen gibt es potenzielle Probleme. So bergen genetisch veränderte Viren die Gefahr, eine starke Immunantwort gegen die Virushülle hervorrufen. Außerdem können sie, wenn sie sich an der falschen Stelle ins Erbgut einbauen, Krebsgene (so genannte Onkogene) aktivieren. Das nichtvirale Einschleusen mit Hilfe von Nanopartikeln wiederum funktioniert noch nicht sehr effizient. Schließlich gelingt beides – sowohl das Einführen von Genen als auch das von Proteinen – meist noch nicht sehr spezifisch, das heißt, es werden dabei nicht nur Tumor-, sondern auch andere Körperzellen verändert.

Adenoassozierte Viren (AAV) könnten helfen, die Probleme des viralen Gentransfers in den Griff zu bekommen. Neu hergestellte AAV-Varianten scheinen keine Krebsgene zu aktivieren und rufen auch keine Immunantwort hervor. Tumorspezifische Antikörper auf der Oberfläche solcher Viren oder außen auf Nanopartikeln könnten deren Zielgerichtetheit verbessern, indem sie sie nur an Tumorzellen andocken lassen. Eine genetische Veränderung der viralen Genfähre mit dem Ziel, den Intrabody nur in ganz bestimmten Tumorzellen zu produzieren, erscheint auch möglich.

Intrabodies werden künftig wohl eine immer größere Rolle spielen, zumal wir heute die Möglichkeit haben, solche gegen fast jedes Protein herzustellen und damit alle möglichen Eiweiße in Zellen zu hemmen. Weil sich Intrabodies gegen verschiedene Stellen eines Proteins richten lassen, ist es möglich, mit unterschiedlichen Varianten von ihnen die biochemischen Funktionen und Wirkmechanismen eines bestimmten Eiweißes sehr detailliert aufzuklären. Die Intrabody-Technologie ergänzt sehr gut die bestehenden Knockdown- und Knockout-Verfahren und sollten auch therapeutische Anwendungen ermöglichen, sobald wir den Gen- und Proteintransport in die Zielzellen hinein besser bewältigen. ◂

QUELLEN

Böldicke T.: Single Domain Antibodies for the Knockdown of Cytosolic and Nuclear Proteins. Protein Science 26, 2017

Böldicke T. (Hg.): Protein Targeting Compounds. Advances in Experimental Medicine and Biology 917, Springer, 2016

Marschall A. L. et al.: Specific in vivo Knockdown of Protein Function by Intrabodies. mAbs 7, 2015

Tsuruta L. R. et al.: Display Technologies for the Selection of Monoclonal Antibodies for Clinical Use. IntechOpen, 2018

INTERVIEW

»METHODEN, METHODEN UND NOCH MAL METHODEN«

Der Physiker Erwin Neher und der Mediziner Bert Sakmann erfanden eine verblüffend einfache Technik, um die Aktivität einzelner Ionenkanäle in Zellmembranen zu messen. Im Gespräch mit Spektrum schildern die beiden Nobelpreisträger, wie sie dabei die Hürden überwanden und warum sie sich nicht mit dem Bewusstsein beschäftigen.

▸▸ spektrum.de/artikel/1626464

Herr Professor Neher, Herr Professor Sakmann, 1992 haben Sie den Spektrum-Lesern in der Mai-Ausgabe ausführlich erläutert, wie man per Patch-Clamp-Technik neue Einsichten in die Signalübertragung bei Zellen gewinnt – ein halbes Jahr nachdem Sie für Ihre gemeinsame Arbeit auf just diesem Gebiet mit dem Nobelpreis ausgezeichnet worden waren. Welche Bedeutung hatte der Artikel seinerzeit für Sie?
Erwin Neher: Der Artikel hat sicherlich dazu beigetragen, dass sich etliche Leute über die Patch-Clamp-Technik informieren konnten. Und vielleicht hat er auch einige Fragen beantwortet, die sonst direkt an uns gerichtet worden wären.

SERIE
Große Forscher im Gespräch



Teil 1: November 2018
Elizabeth Blackburn

Teil 2: Dezember 2018
Gerardus 't Hooft

Teil 3: Januar 2019
Ulf Riebesell

Teil 4: Februar 2019
Frank Wilczek

Teil 5: März 2019
Martin Edward Hellman

Teil 6: April 2019
Erwin Neher und Bert Sakmann

Bert Sakmann: Mir hat er geholfen, die Bedeutung von schönen Bildern zu erkennen. Erwin hatte ja ein erstes Bild entworfen – aber dann sahen wir das Spektrum-Titelblatt! Das war natürlich viel schöner. Und da ist mir klar geworden, wir müssen doch mehr Acht geben auf attraktive Darstellungen.

Dann haben Sie sogar etwas von Spektrum gelernt.
Sakmann: Ja, wir hatten die Grafik vorgezeichnet, und daraus hat ein Künstler dieses Bild geschaffen. Später habe ich mit einem Frankfurter Büro zusammengearbeitet und den Grafikern dort gesagt: Genau so wollen wir das haben.

Welche Bedeutung haben Bilder für die Wissenschaft?
Sakmann: Das kommt darauf an, woran Sie arbeiten. Für einen Mikroskopiker sind Bilder wichtig. Zum Beispiel sind in der Zellbiologie Bilder, in denen die intrazelluläre Lokalisation von fluoreszierenden Proteinen und deren Dynamik sichtbar gemacht werden, nicht mehr wegzudenken. Bei der Flut von schematischen Bildern in der letzten Zeit bin ich aber skeptisch. Ich selbst ziehe einen wissenschaftlichen Graph vor. Erwin, wie siehst Du das?
Neher: Bilder sind sicher gut, um bestimmte Konzepte deutlich zu machen, zum Beispiel die Exozytose: Da zeigt ein Bild ein Vesikel, das erst in der Nähe der Zellmembran liegt und dann mit der Membran verschmilzt. Das ist schon hilfreich.
Sakmann: Aber in der Molekularbiologie sind mittlerweile diese ewigen computergenerierten Bilder von DNA-Strängen eingezogen. Da hängt dann dieses oder jenes Protein dran; das eine ist rund, das andere eckig – mit der Wirklichkeit hat das nichts zu tun. Ich schaue da gar nicht mehr hin.

Rein künstlerische Illustrationen haben also keinen Informationswert?





PATRICK KUNKEL / LINDAU NOBEL LAUREATE MEETINGS

Erwin Neher (* 20. 3. 1944)

ist emeritierter Professor am Max-Planck-Institut (MPI) für biophysikalische Chemie in Göttingen. Nach einem Forschungsaufenthalt an der University of Wisconsin in Madison (USA) lernte der Physiker am Münchener MPI für Psychiatrie Bert Sakmann kennen. Nach der Promotion 1970 an der Technischen Universität München ging er 1972 nach Göttingen, wo er sich 1981 habilitierte. In dieser Zeit wies er mit Sakmann durch die Patch-Clamp-Technik die Existenz von Ionenkanälen in der Zellmembran nach, was 1991 mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin geehrt wurde. Ab 1983 leitete Neher als Direktor die Abteilung Membranbiophysik am MPI für biophysikalische Chemie.

Bert Sakmann (* 12. 6. 1942)

ist emeritierter Professor am MPI für medizinische Forschung in Heidelberg. Nach einer Forschungsassistenz am MPI für Psychiatrie in München und einem Forschungsaufenthalt bei Nobelpreisträger Bernard Katz am University College London promovierte der Mediziner 1974 an der Universität Göttingen und arbeitete gemeinsam mit Erwin Neher an Ionenkanälen. Nach seiner Habilitation 1982 wurde Sakmann 1985 Direktor der Abteilung Zellphysiologie am Göttinger MPI für biophysikalische Chemie, 1989 Direktor am MPI für medizinische Forschung in Heidelberg. 1991 erhielt er zusammen mit Neher den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Seit 2008 leitet er die Emeritus-Arbeitsgruppe »Funktionelle Anatomie einer kortikalen Säule«; 2009 war er wissenschaftlicher Gründungsdirektor des Max Planck Florida Institute for Neuroscience in Jupiter (USA).

Sakmann: Genau. Sie sind verführerisch, aber nicht immer besonders hilfreich. Bei der Anatomie habe ich schon gemerkt, wie wichtig Originalabbildungen in Verbindung mit Schemazeichnungen sind. Hilfreich finde ich Originalabbildungen von Neuronen, so wie man sie unter dem Mikroskop sieht – ohne irgendwelche gekünstelten, veredelten Zeichnungen. Für mich hat das überhandgenommen.

Herr Neher, Sie sind Physiker, Herr Sakmann, Sie sind Mediziner. Wie funktionierte bei Ihrer Arbeit die Verständigung zwischen den verschiedenen Fachgebieten?
Sakmann: Ich hatte das Glück, dass ich von Erwin Physik lernen konnte. Ich habe gemerkt, wie wichtig das ist, und habe das dann nachgelesen. Ich bin sogar in Physikvorlesungen gegangen. Aber ich habe nur das gelernt, was für mich gerade wesentlich war.
Neher: Und ich hatte am Anfang natürlich keine Ahnung von Anatomie und von vielen anderen medizinischen Dingen. Aber die Zusammenarbeit klappte ziemlich problemlos. Wenn man etwas nicht verstanden hat, dann hat man halt nachgefragt oder auch mal nachgelesen. Als ich in den 1960er Jahren von meinem USA-Aufenthalt nach München zurückkehrte, habe ich mich erst einmal ein halbes Jahr in Elektrophysiologie und Biophysik eingelesen, bevor ich bei Hans Dieter Lux begann, mit Schneckenneuronen zu arbeiten. Von daher war mir zumindest das Vokabular bekannt.
Sakmann: Ich erinnere mich noch, wie Erwin mir damals erzählt hat: Am Plattensee gibt es ein Forschungsinstitut, die haben besonders große Schnecken – da muss ich hin! Da habe ich gedacht: Das ist ein richtiger Naturforscher. Und dann ist er noch zu einem Meeresforschungsinstitut in Kroatien gegangen. Also, Erwin hat die Schnecken gejagt!
Neher: Ja, die Leute haben dort mit der Schnecke *Aplysia* gearbeitet, die besonders große Neurone hat. Es gab da einen Kurs, bei dem die Zellen von *Aplysia* mit Elektroden angestochen wurden, um die elektrische Aktivität zu mes-

sen. Und das haben wir zu Hause dann an Weinbergschnecken gemacht.

Bei der von Ihnen beiden erfundenen Patch-Clamp-Technik drücken Sie eine Glaspipette gegen eine Zellmembran – was schwieriger ist, als es klingt. Wie haben Sie die Schwierigkeiten gemeistert?
Sakmann: Ein methodischer Durchbruch bei der Ionenkanalstrommessung kam, als Erwin gemerkt hat, dass man durch einen leichten Unterdruck in der Pipette einen Teil der Membran an die Pipette ansaugen kann. Dadurch hat man einen besseren Abdichtwiderstand und isoliert elektrisch das angesaugte Membranareal vom Rest der Membran. Wir hatten damit eine 100-fach bessere Auflösung.
Neher: Da kamen noch ein paar mehr Dinge zusammen. Das Wichtigste für mich war: Da das Pipettenmachen so mühsam war, hat man immer versucht, die Pipetten öfters zu verwenden und zwischendurch zu reinigen. Dabei wurden sie jedoch fettig – und genau das hat die Abdichtung nach außen verhindert. Wir hatten also nur beim ersten Kontakt eine Chance, Ströme in höchster Auflösung zu messen. Ich weiß nicht, wie oft wir gedacht haben, die Pipette ist verstopft, so dass wir das Experiment abgebrochen haben. Doch dann waren zufällig mit einer dieser verstopften Pipetten tatsächlich Ströme zu sehen.
Sakmann: Hinzu kam, dass die Präparate besser wurden. Wir haben mit Muskelzellen, mit Chromaffinzellen oder mit HeLa-Zellen gearbeitet. Wir versuchten einfach, möglichst viele Zellen eines Typs zur Verfügung zu haben, so dass wir verschiedene Sachen ausprobieren konnten. Doch plötzlich ging zwei Wochen lang nichts mehr.
Neher: Ja, wir hatten systematisch versucht, diese Abdichtung zu verbessern, und dafür alles Mögliche probiert. Bert war Experte in der enzymatischen Reinigung von Oberflächen – doch nichts hat funktioniert. Nur das Immer-kleiner-Machen der Pipetten führte schließlich dazu, dass wir erste Messungen erhielten, allerdings mit sehr schlechter Auflösung. Als es dann plötzlich um den Faktor 100 besser ging, war das Zufall.



Bei der von Erwin Neher und Bert Sakmann erfundenen Patch-Clamp-Technik (deutsch: Membranfleck-Klemme) setzt man eine hauchdünne Glaspipette auf die gereinigte Membran einer Zelle und erzeugt durch leichtes Ansaugen einen schwachen Unterdruck, so dass der Membranbereich nach außen elektrisch isoliert ist. Damit können Ströme durch einen darin liegenden einzelnen Ionenkanal direkt gemessen werden.

Erwin Nehers und Bert Sakmanns **Spektrum**-Artikel »Die Erforschung von Zellsignalen mit der Patch-Clamp-Technik« können Sie online abrufen unter:

spektrum.de/artikel/944534

PATRICK KUNKEL / LINDAU NOBEL LAUREATE MEETINGS

Sakmann: Da herrschte natürlich Riesenaufregung und tolle Euphorie. Plötzlich geht's!
Neher: Wir wussten damals noch nicht, dass man bei der Annäherung einen Überdruck braucht. Es hängt auch von der Steilheit der Pipette und vom Füllstand ab, ob es einen Auswärts- oder einen Einwärtsfluss gibt. Bei einem Einwärtsfluss saugt man sofort während der Annäherung Dreck an, und das verhindert die Messung. Das war diese Krise, in der wir ein paar Wochen lang steckten. Danach war es einigermaßen reproduzierbar.

Sie hatten sich vor 50 Jahren als Doktoranden kennengelernt, haben gemeinsam in Göttingen geforscht und sind seitdem miteinander befreundet. Gab es während Ihrer langen Zusammenarbeit auch Streit?
Sakmann: Mit Erwin kann man keinen Streit haben!
Neher: Nun ja, zumindest haben wir keinen sehr lautstark ausgefochten.

Und warum endete dann Ihre gemeinsame Zusammenarbeit?
Neher: Bert war fasziniert von der in den 1980er Jahren aufkommenden Molekularbiologie. Mit dem japanischen Molekularbiologen Shosaku Numa hatte er begonnen, Ionenkanäle zu klonieren. Dieses Wissen fehlte bei uns in Göttingen.
Sakmann: Ich ging daher nach Heidelberg, dem damaligen Zentrum der Molekularbiologie. Dort fand ich in Peter Seeburg, der leider schon verstorben ist, einen kongenialen Partner, der von Ionenkanälen genauso begeistert war wie ich. Ziel war, die Funktionsweise von Ionenkanälen mit ihrer molekularen Struktur zu korrelieren. Wir haben da sehr viel Arbeit reingesteckt. Heute werden diese Veröffentlichungen überhaupt nicht mehr zitiert, damals war das jedoch vorderste Forschungsfront. Aber das wurde alles schließlich durch Kristallografie abgelöst. Ich habe dann gemerkt, dass ich etwas anders machen muss, weil ich nicht bloß die Vorarbeit für die Kristallografen leisten will.
Neher: Ja, inzwischen ist klar, dass Strukturinformationen für das Verständnis von Mechanismen außerordentlich hilfreich sind.
Sakmann: Ken Holmes, der in Heidelberg neben mir arbeitete, hat mir geraten: Wenn du Strukturen untersuchen willst, mach Kristallografie! Alles andere ist nutzlos. Ich habe mir dann die Kristallzüchtungs- und -reinigungsversuche angeschaut, aber ich war dafür zu unruhig. Inzwischen gibt es ja ganz andere Methoden wie die Elektronenmikroskopie; damit geht es erheblich schneller. Aber das konnte man damals nicht absehen. Was wir machten, war zwar ganz interessant, es lief jedoch letztlich auf ein Raten hinaus. Man fühlt sich dann wie ein Dilettant, man probiert herum, baut verschiedene Punktmutationen in einen Kanal ein, und dann kommt der Kristallograf und sagt, ob man richtig oder falsch geraten hat. Deshalb habe ich das Ionenkanalfeld verlassen.

Wie ging es bei Ihnen weiter, Herr Neher?
Neher: Ich habe mich mit Variationen der Messungen beschäftigt. Wenn man einmal eine empfindliche Methode

»Ich halte das Human Brain Project für ein tot geborenes Kind«

Bert Sakmann

hat, um Ionenströme mit hoher Auflösung zu messen, dann kann man das für verschiedene Dinge verwenden. Man kann zum Beispiel die Kapazität der Zellmembran messen. Eine Veränderung in der Kapazität bedeutet eine Veränderung der Oberfläche – und genau das interessierte mich. Wir haben Kapazitätsmessungen als Maß für Exozytose entwickelt, also für Freisetzungsprozesse durch Vesikel, die Neurotransmitter oder Hormone speichern und mit der Plasmamembran fusionieren, wodurch sich die Oberfläche vergrößert. Das probierten wir zuerst an Chromaffinzellen aus. Das sind Zellen, die Adrenalin aus relativ großen Vesikeln freisetzen. Danach haben wir mit Mastzellen gearbeitet. Sie sind mit sehr großen Granula vollgepackt, die Histamine und verschiedene Zytokine beinhalten. Deren Vesikel sind groß genug, so dass man unter dem Mikroskop beobachten kann, wenn ein solches Bläschen platzt. Und gleichzeitig misst man die Erhöhung der Kapazität. Mit dieser Methode haben wir viele Jahre lang Freisetzungsprozesse sowohl von Hormonen aus Drüsenzellen als auch später dann aus Nervenendigungen studiert, also den Prozess der Exozytose.

Und damit trennten sich Ihre Wege.
Neher: Ja, denn die Methodik der Patch-Clamp-Technik als solche war bis 1981, als wir sie in »Pflügers Archiv« veröffentlicht haben, mehr oder weniger abgeschlossen. Ich bin bei den Einzelzellen geblieben, während Bert in die höheren Sphären ging, sich also mit Hirnschnitten und Zellverbänden beschäftigte.
Sakmann: Ja, die Methode war abgeschlossen, und jetzt öffneten sich viele Forschungsfelder. Mich interessierten Zellen, die nicht einfach nur rund sind, sondern Zellfortsätze haben. Ich wollte zunächst die Dendriten, also die Empfangsantennen der Neurone, studieren – und zwar im Zentralnervensystem, weil die Patch-Clamp-Methode neue Möglichkeiten eröffnete, die es vorher nicht gab. Dabei haben wir zwei bedeutende Entdeckungen gemacht: Zum einen konnten wir zeigen, dass Dendriten elektrisch erregbar sind. Das ist für die Kommunikation zwischen den Nervenzellen sehr wichtig, denn damit wird die Information bei einem erregten Neuron nicht nur entlang des Axons weitergeleitet, sondern gelangt auch wieder zurück zu den Dendriten. Auf Grund dieser elektrischen Erregbarkeit von Dendriten können Neurone als so genannte Koinzidenzdetektoren arbeiten.

Was heißt das?
Sakmann: Für die Entwicklung der Koinzidenzmethode hat der Heidelberger Physiker Walther Bothe den Nobelpreis für Physik bekommen. Das Prinzip ist ganz simpel: Wenn innerhalb eines Zeitfensters zwei unabhängige Eingänge gleichzeitig auftreten, ändert sich nichtlinear der Ausgang.


PATRICK KUNKEL / LINDAU NOBEL LAUREATE MEETINGS

Und ein Äquivalent zu dieser Koinzidenzdetektion haben wir mit der Patch-Clamp-Methode bei Dendriten entdeckt, denn damit konnten wir die Wechselwirkung zwischen zwei Neuronen innerhalb von ein paar Millisekunden exakt untersuchen.

Und die zweite Entdeckung?
Sakmann: Die zweite Entdeckung war eigentlich zuvor: Mit Hilfe der feinen Auflösung konnten wir so genannte plastische oder Langzeitveränderungen messen – und zwar an nur zwei Neuronen und nicht etwa an hunderten. Das war vorher nicht möglich. Dabei haben wir die Spike-Timing-Dependent Plasticity entdeckt. Das ist ein Mechanismus, bei dem in Abhängigkeit vom elektrischen Potenzial in Dendriten und Axonen die Synapse entweder verstärkt oder abgeschwächt wird. Das hat mich dann jahrelang beschäftigt. So ist das immer mit Entdeckungen: Man stößt auf ein Phänomen, und damit stellen sich x Fragen. Und dann braucht man Jahre, bis man versteht, was los ist. Ich hatte das Glück, dass ich diesen zwei Vorgängen innerhalb von zehn Jahren nachsteigen konnte.

Sie forschen jetzt beide über das Gehirn, wenn auch auf verschiedenen Gebieten. Weltweit werden erhebliche Ressourcen in die Hirnforschung investiert wie etwa beim europäischen Human Brain Project. Was halten Sie davon?
Neher: Es ist sicher gut, wenn die Gesellschaft mehr in Hirnforschung investiert, aber das durch die EU geförderte Hirnprojekt sehe ich ambivalent. Solche Riesenprojekte sind nicht der richtige Ansatz.

Warum nicht?
Neher: Wir sind noch so weit entfernt von einem Verständnis, wie es dort angestrebt wird. Das Feld ist viel zu offen, um planen zu können, wo 100 Forscher parallel voranschreiten. Oder wie siehst du das, Bert?
Sakmann: Genauso. Ich halte das Human Brain Project für ein tot geborenes Kind. Wenn Sie fragen, wo die Zukunft liegt: in der Entwicklung von Methoden, Methoden und noch mal Methoden. Ohne das gibt es keinen Fortschritt.
Neher: Das machen ja die Amerikaner mit ihrer Brain-Initiative; sie setzen einen Schwerpunkt auf Methodenentwicklung. Und da kommt viel Neues heraus: zum Beispiel die Optogenetik. Sie verspricht, den Traum eines jeden Neurowissenschaftlers zu erfüllen – zu sehen, was im Gehirn in vielen Zellen gleichzeitig vorgeht, und diese dann auch noch zu manipulieren. Aber da steckt sicher noch etliches in den Kinderschuhen. Es gibt ganz neue Methoden, um Verschaltungen im Gehirn zu verfolgen. Das ist alles viel Kleinarbeit.
Sakmann: Ja, ich denke da an die Serial-Block-Face-Elektronenmikroskopie. Diese Methode hat sehr viel versprechend angefangen, doch je weiter man fortschreitet, desto mehr Probleme treten auf. Die Idee dahinter ist, eine Verschaltung von Neuronennetzwerken mit einer elektronenmikroskopischen Auflösung zu erhalten. Ich arbeitete in Heidelberg zehn Jahre neben Winfried Denk, dem Protagonisten dieser Methode. Ich halte das für ein Projekt, das die Grundlage dafür liefert, was wir funktionell verstehen wollen. Es wird gut finanziert, es fehlt aber an pfiffigen Leuten. Das ist eine sehr langfristige Entwick-

lung und erfordert jahrelange Investitionen. So haben Forscher des amerikanischen Janelia Farm Research Campus ein vollständiges elektronenmikroskopisches Bild vom Gehirn der Taufliege *Drosophila* angefertigt. Aber man versteht das Gehirn damit noch nicht. Vielleicht sehe ich das einseitig, allerdings ohne detaillierte Anatomie geht es nicht.

Wird der Mensch sein Denkorgan jemals begreifen können?
Sakmann: Was heißt begreifen? Man kann nicht alles auf einmal erfassen, man kann jedoch einfache Funktionen wie zum Beispiel die Wahrnehmung eines Bilds oder eines Tons im primären Kortex in allen Details untersuchen. Ich denke, das wird in den nächsten zehn Jahren kommen. Aber wenn Sie noch höhere Funktionen verstehen wollen …

… wie Bewusstsein …
Sakmann: … darüber denke ich nicht nach.
Neher: Der Begriff »Gehirn verstehen« ist undefiniert, weil die Frage bleibt, in welche Tiefe man gehen will. Bestimmte Aspekte des Gehirns verstehen wir gut. Man weiß zum Beispiel, welche mathematischen Operationen das Gehirn macht, damit ein Bild stationär bleibt, wenn man den Kopf bewegt. Das ist alles gut untersucht, aber wenn Sie nach Bewusstsein fragen: Da müssen wir passen.
Sakmann: Das überlassen wir den Philosophen. Philosophieren heißt ja, Fragen stellen. Mich interessieren eher die Mechanismen. So kommt man auf dem Niveau der Blackbox wie in einem Baukasten operationell weiter: Da gibt es einen Autokorrelator und einen Kreuzkorrelator und eine Instanz, die Fehler ausrechnet. Das Paradebeispiel hierfür ist die optomotorische Antwort, die der Biokybernetiker Werner Reichardt vor über 50 Jahren analysierte. Er zeigte einem Käfer ein sich drehendes Streifenmuster, worauf dieser entsprechend reagierte. Wie der Käfer das macht, konnte Reichardt mit einem Ersatzschaltbild perfekt lösen. Einer seiner Schüler, Alexander Borst, arbeitet seit 30 Jahren daran, diese Blackboxes mit Neuronen aufzufüllen, und er wird das sicher hinbekommen. Die optomotorische Antwort ist nur ein ganz einfaches Verhalten; der Käfer macht natürlich viel mehr. Aber wir sind noch ganz weit davon entfernt, das zu verstehen.

Was halten Sie von der These von Thomas Heimburg, Nervenzellen würden Informationen über mechanische Druckwellen weiterleiten (siehe Spektrum September 2018, S. 12)?
Neher: Ich kenne Thomas Heimburg aus unserer gemeinsamen Zeit in Göttingen, wo er wertvolle Beiträge zur Dynamik von Lipidmembranen lieferte. Aber aus meiner Sicht ist er in Fantasievorstellungen abgedriftet. Er beschreibt Prozesse, die in reinen Lipidmembranen wahrscheinlich auftreten, blendet jedoch eine ganze Reihe von anderen Erscheinungen aus. Ich habe es aufgegeben, seine neueren Arbeiten zu studieren. Einige der älteren Untersuchungen haben einfach vernachlässigt, dass die Membran, auf der eine mechanische Welle entlanglaufen soll, viskos mit dem Darunterliegenden verbunden ist. Die Viskosität kam aber in seinen Berechnungen gar nicht vor. Und dann sind die Solitonen, also die Wellenpakete, die er beschreibt, sehr stark temperaturabhängig. Nach der Theorie treten sie bei einer ganz bestimmten Temperatur in einem idealen System von Lipiden auf. Wir können aber bei einer Schnecke Aktionspotenziale bei 5 Grad und auch bei 25 Grad Celsius auslösen. Es gibt zwar eine bestimmte Temperaturabhängigkeit, jedoch bei Weitem nicht so, wie das die heimburgsche Theorie impliziert.

Was sind Ihre aktuellen Forschungsfragen?
Neher: Ich arbeite im Augenblick daran, Daten auszuwerten, die meine Mitarbeiter in den letzten zehn Jahre gewonnen haben über synaptische Kurzzeitplastizität, also wie sich die synaptische Antwort verändert, wenn man Neurone mit verschiedenen Frequenzen reizt. Bei manchen Zellen wird die Antwort kleiner, was man Depression nennt, bei anderen geschieht genau das Gegenteil. Ich versuche zu verstehen, warum das so ist und wie das mit dem Mechanismus der Freisetzung, der Exozytose, zusammenhängt.

Und bei Ihnen, Herr Sakmann?
Sakmann: Ich arbeite nur noch in vivo. Ich habe das Glück, dass ich mit einem ehemaligen Mitarbeiter zusammenarbeiten kann, Arthur Konnerth, der sehr hoch aufgelöste optische Messungen machen kann und zugleich ein Experte in der Anwendung der Patch-Clamp-Technik im Gehirn ist. Das Faszinierende daran ist, dass Zellen, die anatomisch ähnlich ausschauen, durchaus verschiedene Eigenschaften haben. Die Zellen in der Hirnrinde werden klassifiziert nach ihren Dendriten und Axonen, lassen sich also optisch gut unterscheiden. Doch in einem Ensemble von 20 Neuronen reagieren ein paar Prozent ganz anders, obwohl sie gleich aussehen. Das heißt, unsere Annahme, wenn Neurone gleich aussehen, dann antworten sie auch gleich, ist falsch. Damit stellt sich die Frage: Wohin projizieren diese Zellen, und woher kriegen sie einen Input? Doch die Klassifizierung der Neurone, die wir nach jahrzehntelanger Arbeit eingeführt haben, erweist sich als zu vereinfacht. Es ist also alles noch komplizierter. ◂

Das Gespräch führten die **Spektrum**-Redakteure **Andreas Jahn** und **Carsten Könneker** während der Lindauer Nobelpreisträgertagung im Juni 2018.

QUELLEN

Hamill, O.P. et al.: Improved patch-clamp techniques for high-resolution current recording from cells and cell-free membrane patches. Pflügers Archiv – European Journal of Physiology 391, 1981

Neher, E., Sakmann, B.: Single-channel currents recorded from membrane of denervated frog muscle fibres. Nature 260, 1976

1919



Bei Nebel … … sorgt ein Rotfilter für klare Sicht.

DURCHBLICK DANK ROTLICHT

»Wer eine nebelige Landschaft durch verschiedenfarbige Gläser betrachtet, der wird die Beobachtung machen, daß die Struktur der Ferne durch ein gelbes oder rotes Glas gesehen viel deutlicher erscheint als im Tageslicht. Es beruht dies darauf, daß langwellige Strahlen trübe Medien besser durchdringen als kurzwellige. Zur genaueren Erforschung der Erscheinung benutzte Prof. W. Scheffer künstliche Nebel, die er durch einen Niederschlag von Bariumsulfat in farbloser Gelatinelösung herstellte. Diese trüben Lösungen wurden vor den Objektiven aufgestellt. Bei diesen Versuchen wurde eine Beobachtung gemacht, die von praktischer Bedeutung sein kann: Augenleidende mit Trübungen der durchsichtigen Medien des Auges sehen im roten Licht viel besser als im weißen.« *Prometheus 1536, S. 216*

EIN RÄUSPERN IN DER STEPPE

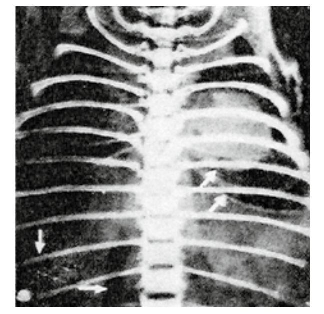
»Beim Durchstreifen von Rain und Steppe in Chile kann man im Frühjahr wie im Sommer einen auffallenden Laut, wie ein kurzes ›tüt‹ oder ›tü-it‹, vernehmen. Geht man diesem Tone nach, so wird man auf die Anwesenheit einer Blumenwespe aufmerksam. Es handelt sich ausschließlich um Weibchen der Apiden-Unterfamilie der Beinsammler. [Der Entolomologe Paul Herbst, Valparaiso,] nimmt an, daß die pollensammelnden Bienen die Stigmen oder tieferen Luftwege von eingedrungenem Blütenstaub zu reinigen benötigen und zu diesem Zwecke ›tüten‹. Herbst nennt es eine Art ›Räuspern‹.« *Prometheus 1538, S. 232*

UND HÄLT UND HÄLT …

»Durch einen an der Kolumbia-Universität erfundenen Trocknungsprozeß ist es ermöglicht, Fleisch und Fisch jahrelang aufzubewahren. Man glaubt, daß dadurch die Fleischversendungen enorm vergrößert werden können. Knochen, Fett und Gewebe werden entfernt. Das Fleisch wird in Würfel geschnitten, Rindfleisch in Scheiben, in einem luftleeren Raum untergebracht und bei einer verhältnismäßig niedrigen Temperatur [in 10 Stunden getrocknet]. Fisch in 4 – 8 Stunden. Das Fleisch unterliegt keiner sichtbaren oder chemischen Veränderung, nur das Wasser verdampft. Es enthält keine Fäulniskeime, so daß es auf unbestimmte Zeit ohne Kühlung aufbewahrt werden kann.« *Die Umschau 16, S. 252*

1969

DIAGNOSTIK MIT NEUTRONEN



Röntgenaufnahme (oben) und Neutronenradiogramm (unten).



»Seit kurzem ist es möglich, auch Neutronenstrahlung für die medizinische Durchleuchtungstechnik dienstbar zu machen. Dabei kommt der neuen Methode zugute, daß Neutronen durch Wasser stärker absorbiert werden. Blutgefäße erscheinen daher im Negativ weiß, Lungen und Luftblasen im Gefäßsystem schwarz. Bei einer Thoraxaufnahme fallen die Rippen praktisch weg, so daß man nicht mehr auf komplizierte Wegprojizierung derselben mittels Schrägaufnahmen und computergesteuerter Überlagerung angewiesen ist.«

Naturwissenschaftliche Rundschau 4, S. 178 (Heute wird das Verfahren vor allem in der Materialforschung angewendet. Anm. d. Red.)

WIR WERDEN IMMER ÄLTER

»Die Paläomedizin nennt für die Prähomininen ein durchschnittliches Lebensalter von 16 bis 21 Jahren. Erst im jüngeren Abschnitt des Eiszeitalters mit dem Auftreten des *Homo sapiens* werden durchschnittlich 22 bis 25 Lebensjahre erreicht. Die Wikinger wurden bereits zwischen 23 und 40 Jahre alt. Die 1954 Geborenen können mit einer mittleren Lebenserwartung von 71 Jahren rechnen. Neueren futurologischen Berichten zufolge wird, dank der schnellen medizinischen und naturwissenschaftlich-technischen Entwicklung, für das Jahr 2020 eine gegenüber heute 40 bis 50 Jahre erhöhte Lebenserwartung angegeben.« *Kosmos 4, S. *110*

LEUCHTFARBE STATT BELEUCHTUNG

»Ein elektrisch betriebenes Fahrrad bietet eine amerikanische Firma an. Eine hinter dem Sattel angebrachte 12-Volt-Batterie treibt fünf winzige Motoren an, die an der Nabe des Vorderrads befestigt sind. Ein solches Fahrrad soll imstande sein, 160 Kilometer in einer Geschwindigkeit von 30 Stundenkilometern zurückzulegen. Eine japanische Firma hat ein Fahrrad auf den Markt gebracht, dessen gesamter Rahmen mit Leuchtfarbe gestrichen ist, wodurch die Gefahr von nächtlichen Unfällen erheblich vermindert wird.« *Neuheiten und Erfindungen 388, S. 63*

MEERESBIOLOGIE
DAS BESTE AUS ZWEI WELTEN

»Mixotrophe« Kleinstlebewesen im Meer ernähren sich wie Tiere von anderen Organismen und betreiben zugleich Fotosynthese wie Pflanzen. Sie sind in allen Ozeanregionen weit verbreitet und beeinflussen sowohl Fischbestände als auch das Klima.



Aditee Mitra ist Dozentin an der Swansea University in Wales und erforscht Nahrungsnetze im Ozean mit Hilfe von Computermodellen. Ihr besonderes Interesse gilt dem marinen Plankton.

⏩ spektrum.de/artikel/1626466

AUF EINEN BLICK
HALB PFLANZE, HALB TIER

1. Lange dachten Forscher, dass zwei Planktontypen die Basis für das Nahrungsnetz im Ozean bilden: Phytoplankton (Mikroalgen), das Fotosynthese betreibt, und Zooplankton, das sich von Kleinstlebewesen ernährt.

2. Inzwischen steht fest, dass sich zahlreiche Einzeller gemischt ernähren (»Mixotrophe«). Sie nutzen wahlweise das Licht der Sonne oder jagen andere Organismen.

3. Mixotrophe sind wichtig für den Kohlenstoffkreislauf im Ozean, bieten Fischlarven eine Nahrungsquelle und können toxische Algenblüten verursachen.

Das Meer vor der spanischen Küste sieht ruhig und friedlich aus. An der Oberfläche treiben, mit bloßem Auge nicht sichtbar, mikroskopische Algen. Einige sind orangepink gefärbt, andere dunkelgrün. Sie betreiben Fotosynthese, nutzen also das Licht der Sonne, um CO_2 in Biomasse umzuwandeln.

Plötzlich taucht ein Wimpertierchen der Gattung *Mesodinium* auf – mit einer Größe von 22 Mikrometern ist es ein wahrer Gigant neben den drei Mikrometer kleinen Algen. Auf einem Zickzackkurs folgt es der Spur aus Zuckermolekülen und Aminosäuren, die seine Beute hinterlässt. Die Tentakel des Jägers schießen nach vorn und umschließen die grünen Nanoflagellaten, die anschließend vollständig verdaut werden.

Beim Verspeisen der pinken Algen, so genannter Cryptophyten, geht das Wimpertierchen selektiver vor: Den Großteil der Beute zerkleinert und verdaut es; die Chloroplasten jedoch – jene Zellorganellen, in denen die Fotosynthese stattfindet –, verleibt sich der Jäger als Ganzes ein,



Ein mixotropher Dinoflagellat der Gattung *Dinophysis* saugt Chloroplasten aus einem mixotrophen Wimpertierchen der Gattung *Mesodinium* (Illustration).

MARK ROSS STUDIO

so dass diese weiterhin funktionsfähig sind. Binnen Minuten färbt sich das *Mesodinium* dadurch dunkelrot. Die Aufnahme der Chloroplasten erlaubt es dem Räuber, nun selbst CO_2 zu fixieren. Seine Strategie, sowohl andere Organismen zu fressen als auch Fotosynthese zu betreiben, nennt man Mixotrophie: gemischte Ernährung.

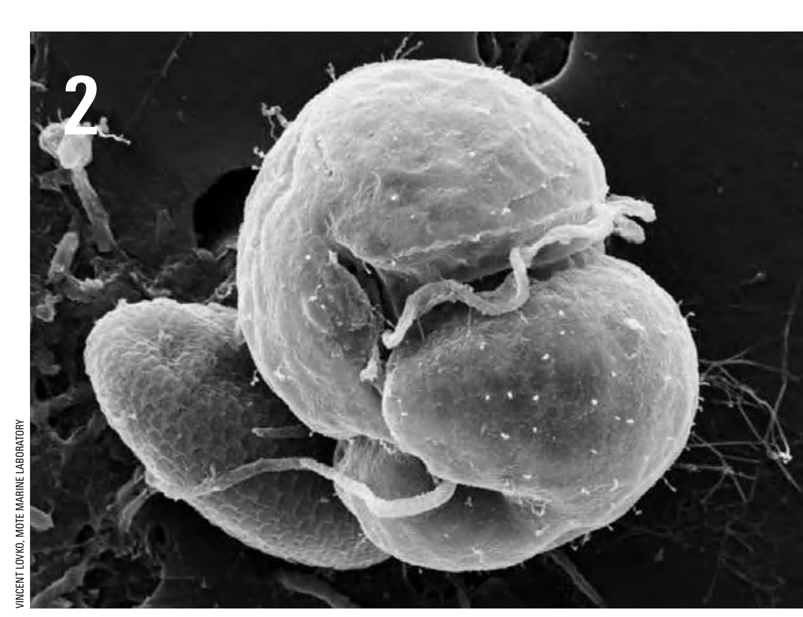
Das Wimpertierchen wird allerdings bald selbst zur Beute. Denn in der Nähe lauert ein noch größerer mixotropher Einzeller, ein so genannter Dinoflagellat oder Panzergeißler der Gattung *Dinophysis*. Er umkreist das *Mesodinium* und feuert schließlich harpunenartige Fäden ab, die es bewegungsunfähig machen (siehe Foto S. 55). Anschließend durchbohrt er das Opfer mit einem stielartigen Fortsatz, den man Pedunkel nennt, und saugt seinen Inhalt aus; inklusive der zuvor gestohlenen Chloroplasten, die er nun selbst nutzt, um Energie zu gewinnen.

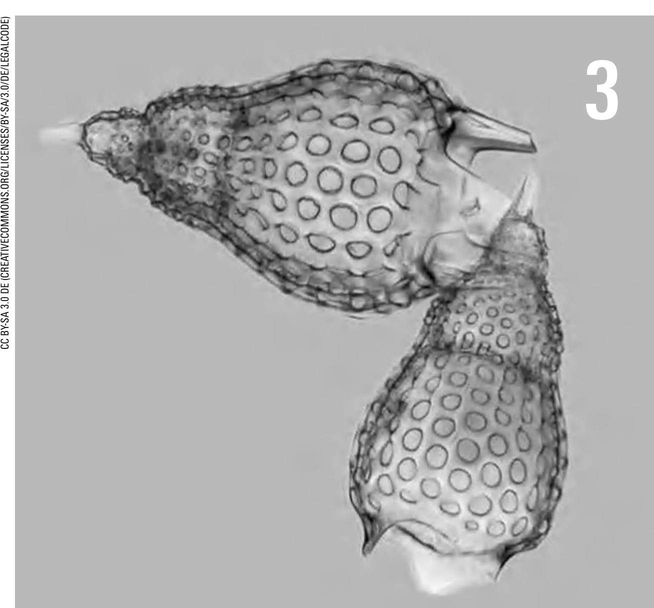
Diese Räuber sind lediglich zwei Beispiele für zahllose mixotrophe Kleinstlebewesen, die in den Ozeanen schwimmen. Meeresforscher hielten solche Organismen lange für eine kuriose Minderheit, verglichen mit den beiden größten Gruppen einzelligen Planktons, die das Nahrungsnetz im Meer vermeintlich dominieren. Eine davon, das Phytoplankton, nutzt wie Pflanzen Lichtenergie und anorganische Nährstoffe (vor allem Nitrat und Phosphat), um zu gedeihen. Die andere Gruppe, das Zooplankton, ernährt sich von den winzigen Algen. So werden organisch gebundener Kohlenstoff und Nährstoffe über die Nahrungskette zu größeren, vielzelligen Organismen weitergereicht. Neben diesen Puristen galten Mixotrophe bislang zwar als Multitalente, aber gleichzeitig als ineffizient.

Inzwischen wissen wir: Das traditionelle Bild des Nahrungsnetzes im Meer ist zu einfach gezeichnet. Durch Experimente, Beobachtungen und Computermodelle von Planktonpopulationen konnten meine Kollegen und ich vor Kurzem zeigen, dass die Ernährungsweise von einzelligem Plankton in den meisten Fällen weder allein auf Fotosynthese beruht noch ausschließlich auf dem Verzehr von Mikroalgen. Die große Mehrheit pflegt in Wirklichkeit einen mixotrophen Lebensstil. Damit ist die Basis der Nahrungskette weitaus flexibler als angenommen. Denn mixotrophe Einzeller sind weniger stark davon abhängig, wie viel Licht für die Fotosynthese zur Verfügung steht; stattdessen können sie wachsen und sich vermehren, indem sie andere Organismen fressen.

Die Auswirkungen dieser Fähigkeit reichen von der Atmosphäre bis hin zu Fischbeständen. So beeinflusst der Anteil an mixotrophen Lebewesen etwa, wie schnell die Ozeane CO_2 aufnehmen und als organisches Material in die Tiefsee verfrachten. Mixotrophe könnten zudem weniger anfällig für die jahreszeitliche Zu- und Abnahme der Lichtintensität sein. Eine derartige Flexibilität und Widerstandsfähigkeit kann Vorteile mit sich bringen, zum Beispiel für Fischlarven, die winzige Nahrung in ausreichender Menge benötigen. Es gibt jedoch auch Arten, die toxische Algenblüten bilden und damit die Schließung ganzer Muschelfarmen erzwingen oder Massenfischsterben verursachen.

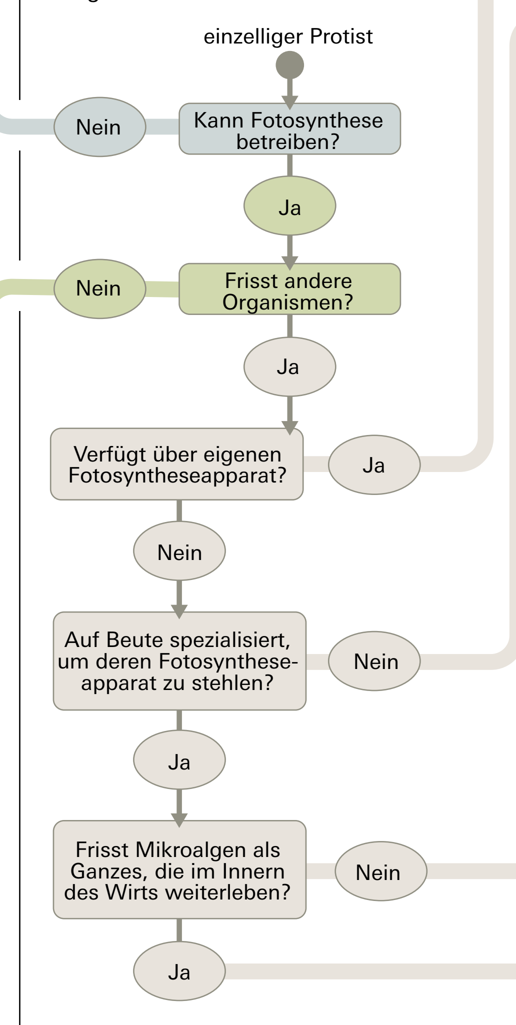
Mixotrophe haben unterschiedliche Ernährungsstrategien entwickelt. Einige wie *Tripos longipes* (1) oder Arten der Gattung *Karlodinium* (2) besitzen Gene für die Fotosynthese und fressen andere Mikroorganismen. Vertreter der Gattung *Nassellaria* (3) hingegen stehlen Algen ihre Chloroplasten, um die Energie der Sonne nutzen zu können.





Ein neuer Plankton-Zoo

Mikroplankton sind einzellige Organismen, die im Ozean treiben. Sie bilden die Basis des marinen Nahrungsnetzes. Bis vor Kurzem galt: Plankton ähnelt entweder Pflanzen oder Tieren. Neue Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass die Mehrzahl der Vertreter des Mikroplanktons mixotroph lebt. Das heißt, sie betreiben Fotosynthese und fressen zugleich andere Einzeller. Je nach Ernährungsstrategie werden Mixotrophe einer von vier Klassen zugeordnet:



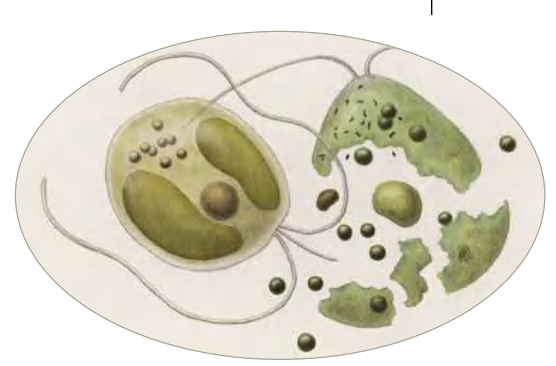
Mikrozooplankton

Diese Organismen ernähren sich ausschließlich von Mikroalgen und anderen Kleinstlebewesen.

Mixotrophe

Konstitutive Mixotrophe

Diese Räuber können die für die Fotosynthese notwendigen Pigmente und Enzyme selbst herstellen. Das Bild zeigt, wie *Prymnesium parvum* die Grünalge *Dunaliella tertiolecta* erbeutet.



nicht konstitutive Mixotrophe – Generalisten

Diese Organismen stehlen verschiedenen Algen Zellorganellen für die Fotosynthese. Hier nimmt das Wimpertierchen *Strombidium oculatum* eine frei schwimmende Zelle der Alge *Ulva* auf.



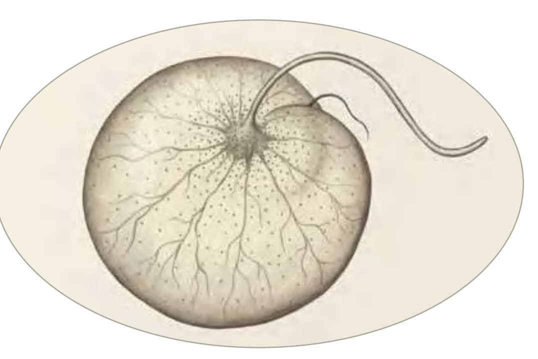
nicht konstitutive Mixotrophe – Zellorganellen-Spezialisten

Diese Einzeller berauben nur bestimmte Arten ihrer Chloroplasten und töten sie dabei. So wie der Dinoflagellat *Dinophysis acuminata*, der hier das Wimpertierchen *Mesodinium rubrum* aussaugt.



nicht konstitutive Mixotrophe – Endosymbiose-Spezialisten

Vertreter dieser Gruppe verschlucken ganze Kolonien intakter Algen, die im Innern des Wirts weiterleben. Dazu gehört *Noctiluca scintillans*, die hier mit Grünalgen namens *Pedinomonas noctilucae* gefüllt ist.



Mikrophytoplankton

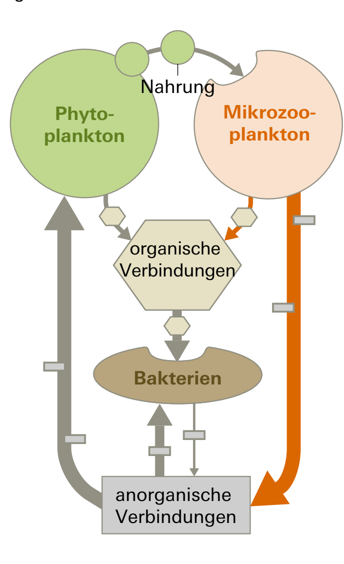
Diese Gruppe umfasst einzellige Algen, die wie Landpflanzen Fotosynthese betreiben.

REBECCA GELERNTER, NACH MITRA, A. ET AL.: DEFINING PLANKTONIC PROTIST FUNCTIONAL GROUPS ON MECHANISMS FOR ENERGY AND NUTRIENT ACQUISITION: INCORPORATION OF DIVERSE MIXOTROPHIC STRATEGIES. PROTIST 167, 2016 / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Unterschätzte Einzeller

Berücksichtigt man Mixotrophe in Computermodellen, die das marine Nahrungsnetz simulieren, bewirkt das deutliche Veränderungen gegenüber Szenarien, die nur zwischen Phytoplankton und Zooplankton unterscheiden. Das betrifft etwa die Art, wie Nährstoffe in der Nahrungskette zirkulieren und Populationen wichtiger Mikroorganismen wachsen oder schrumpfen. Forscher haben Modelle entwickelt, die entweder Mixotrophe enthalten, die den Fotosyntheseapparat anderer Organismen stehlen, oder solche mit der angeborenen Fähigkeit, Lichtenergie zu nutzen. Beide stimmen besser mit den Beobachtungen überein, die Wissenschaftler im Ozean gemacht haben, als traditionelle Modelle ohne Mixotrophe.

Traditionelles Szenario
Phytoplankton nutzt Sonnenenergie, um aus anorganischen Verbindungen Biomasse aufzubauen, und wird vom Mikrozooplankton gefressen. Bakterien zerkleinern organische Moleküle und setzen Nährstoffe wieder frei. Dieser enge Kreislauf begrenzt die Populationsgrößen.



Klassische Planktonsukzession
Während eines 30-Tage-Zyklus blüht nach traditioneller Vorstellung zuerst das Phytoplankton (grün). Mit einer gewissen Verzögerung wächst dann das Zooplankton (orange) und dezimiert die Algen wieder.

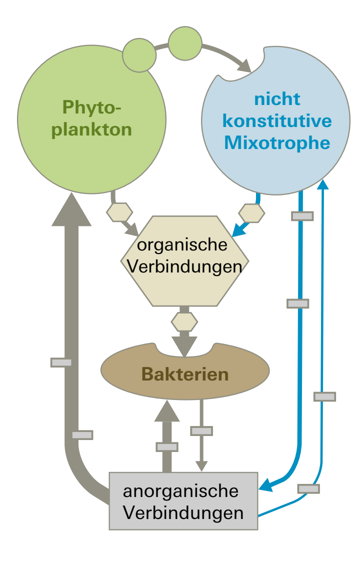
Veränderung der Planktonpopulation

Phytoplankton
Bakterien
Mikrozoo-
plankton
Tage: 0 10 20 30

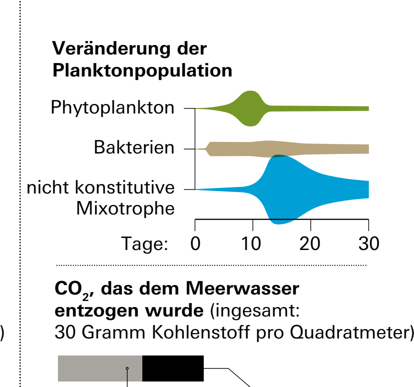
CO_2, das dem Meerwasser entzogen wurde (ingesamt:
30 Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter)

durch Phytoplankton

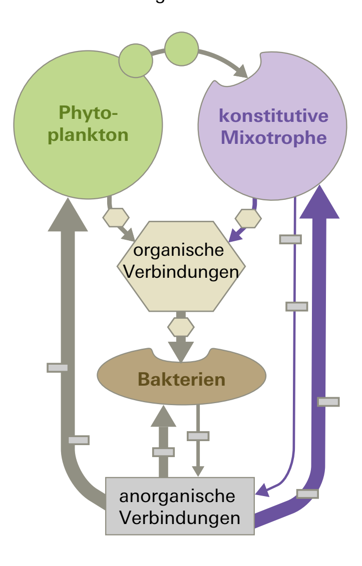
Tiere, die Fotosynthese betreiben
Einzellige Räuber, die auch Fotosynthese betreiben (nicht konstitutive Mixotrophe), speichern mehr Nährstoffe als Mikrozooplankton, das ausschließlich andere Organismen frisst. Der dünne blaue Pfeil zeigt den geringeren Nährstoffverlust an.



Populations-Boom
Nicht konstitutive Mixotrophe (blau) wachsen stärker als traditionelles Mikrozooplankton. Gestohlene Chloroplasten oder einverleibte intakte Algen liefern zusätzliche Energie. Schrumpft die Beutepopulation, verlangsamt sich ihr Wachstum.



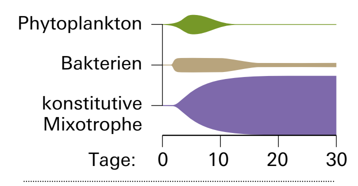
Pflanzen, die Beute machen
Ersetzt man traditionelles Mikrozooplankton durch Algen, die nebenbei jagen (konstitutive Mixotrophe), ergibt sich ein deutlich anderes Muster: Räuberische Algen verwerten große Mengen anorganischer Moleküle (violetter Pfeil) und können die Population dadurch lange ernähren.



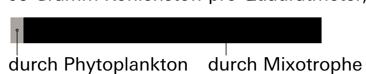
Unabhängiges Wachstum
Mit der angeborenen Fähigkeit zur Fotosynthese benötigen konstitutive Mixotrophe (violett) lediglich geringe Mengen an zusätzlicher Nahrung in Form von Phytoplankton, um zu gedeihen. Ihre Population wächst schnell und bleibt bis zum Ende der 30 Tage stabil.



Veränderung der Planktonpopulation



CO_2, das dem Meerwasser entzogen wurde (ingesamt:
65 Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter)



JEN CHRISTIANSEN, NACH MITRA, A. ET AL.: DEFINING PLANKTONIC PROTIST FUNCTIONAL GROUPS ON MECHANISMS FOR ENERGY AND NUTRIENT ACQUISITION: INCORPORATION OF DIVERSE MIXOTROPHIC STRATEGIES. PROTIST 167, 2016 / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Mitte der 2000er Jahre, während meiner Doktorarbeit über Mikrozooplankton, habe ich mich erstmals mit Mixotrophen beschäftigt. In den Lehrbüchern wurden sie als ungewöhnliche Rarität beschrieben. Mir hingegen erschien die in einer Zelle vereinte Fähigkeit, Fotosynthese zu betreiben und zu jagen, geradezu perfekt, und ich wunderte mich, warum es im Ozean nicht mehr mixotrophe Organismen geben sollte. Auf der Suche nach weiteren Informationen stieß ich auf zahlreiche Publikationen der Planktonökologin Diane Stoecker vom Horn Point Laboratory der University of Maryland. Ihre Forschung ließ vermuten, dass Mixotrophie deutlich weiter verbreitet ist. Doch wie viele derartige Organismen gab es, und welche Rolle spielten sie für das Ökosystem Meer?

Bis zu einer ersten großen Bestandsaufnahme galt Mixotrophie als Nischenphänomen

Mit Hilfe mathematischer Modelle simuliere ich Nahrungsnetze und das Verhalten verschiedener Organismen darin am Computer. Als ich an meiner Doktorarbeit schrieb, gab es jedoch kein Ökosystemmodell, welches das »Doppelleben« mixotropher Einzeller adäquat nachbildete. Also entwickelte ich mit dem Meeresbiologen Kevin Flynn – meinem Ehemann – im Jahr 2009 ein Modell, das verschiedene mixotrophe Planktonpopulationen repräsentierte: solche, die sich überwiegend von Fotosynthese ernährten, und solche, die eher Jagd auf andere machten.

Unser Ziel war es, zu zeigen, dass ein Modell mit Mixotrophen die ökologischen Prozesse im Ozean realistischer wiedergibt als Simulationen, die nur zwischen Phyto- und Zooplankton unterscheiden. Wir passten die Parameter des Modells so lange an, bis der Transfer von Nährstoffen innerhalb des Nahrungsnetzes und die Aktivität von Bakterien oder etwa Ruderfußkrebsen den Beobachtungen in der Natur entsprachen. Die daraus resultierenden Dynamiken im Nahrungsnetz unterschieden sich deutlich von jenen in konventionellen Modellen. Das war im Jahr 2010.

Aber Computersimulationen reichten nicht. Wir mussten Feld- und Laborexperimente durchführen, um Belege für die Hypothese zu sammeln, dass Mixotrophe für die Nährstoffkreisläufe im Ozean eine wichtige Rolle spielen. Als Förderer konnten wir den Leverhulme Trust, eine große britische Stiftung im Bereich Bildung und Wissenschaft, gewinnen. Mit dem Geld organisierten wir 2011 die erste Konferenz über mixotrophe Organismen. Forscher aus aller Welt teilten dort ihre Erkenntnisse mit anderen Experten.

Bei diesem Treffen erstellten wir eine Liste aller damals bekannten Planktonarten, die sowohl anderes Plankton fressen als auch Fotosynthese betreiben. Es stellte sich heraus, dass Mixotrophe sämtliche Meeresregionen erobert haben, von den Küsten bis zu den entlegenen Zentren der Ozeane, vom Äquator bis zu den Polen. Wissenschaftler hatten das Plankton an Bord von Forschungsschiffen studiert und einige Arten für weitere Experimente in ihre Labore gebracht. Sie hatten das Nährstoffangebot variiert, ebenso die Lichtintensität und die Beuteverfügbarkeit, um zu verstehen, wie sich Mixotrophe unter verschiedenen Umweltbedingungen verhalten. Bis wir jedoch anfingen, die verschiedenen Beobachtungen systematisch zu sichten, glaubten viele Forscher, Mixotrophie sei ein wenig bedeutsames Nischenphänomen.

Nun reifte die Erkenntnis: Mixotrophe Einzeller spielen eine wichtige Rolle für die Ökologie der Meere. Der Planktonexperte Per Juel Hansen von der Universität Kopenhagen und seine Kollegen hatten zum Beispiel demonstriert, dass Populationen von *Mesodinium* zusammenbrechen, wenn sie nicht genügend Cryptophyten finden, denen sie Chloroplasten stehlen können. Und die Arbeitsgruppe um Diane Stoecker sowie Forscher der Staatlichen Universität Seoul hatten beobachtet, dass Mixotrophe umso mehr Organismen fressen, je mehr Fotosynthese sie selbst betreiben. Die beiden Arten der Energieversorgung verstärken sich also offenbar gegenseitig. Auch scheinen bestimmte Mixotrophe stärker von einer größeren verfügbaren Menge an Licht und Nährstoffen zu profitieren als Plankton, das sich ausschließlich mittels Fotosynthese oder der Jagd nach anderen Einzellern ernährt.

Wenig später fingen wir an, mixotrophes Plankton in verschiedene Klassen einzuteilen, je nachdem, was und wie sie fressen und wie sie Fotosynthese betreiben. Dabei erkannten wir vier Typen, die sich in ihrem Verhalten deutlich unterscheiden.

Das erste Merkmal ist die Fähigkeit, Lichtenergie zu nutzen: Sind sie in der Lage, die für die Fotosynthese notwendigen Enzyme und Pigmente (wie Chlorophyll) selbst zu produzieren, oder stehlen sie ihrer Beute Chloroplasten? Erstere werden konstitutive Mixotrophe genannt. Dazu gehören viele Einzeller, die wichtige Bindeglieder in der Nahrungskette bilden, aber auch solche, die zur Bedrohung für ein Ökosystem werden können. Dinoflagellaten der Gattung *Karlodinium* etwa rufen in Küstenregionen rund um den Globus toxische Algenblüten hervor und sorgen so für Massenfischsterben. Ebenfalls tödlich sind Algen der Gattung *Prymnesium*. Sie produzieren ein Molekül, das die Membran anderer Einzeller zerstört und diese dadurch platzen lässt. Für Menschen wiederum können Dinoflagellaten namens *Alexandrium* gefährlich werden, wenn sie massenhaft auftreten. Ihre Giftstoffe reichern sich in Muscheln an, weil diese große Mengen Meerwasser filtrieren. Bei deren Verzehr kann es dann zu einer so genannten paralytischen Muschelvergiftung kommen, die im schlimmsten Fall zu Atem- oder Herzstillstand führt.

Nicht konstitutive Mixotrophe nutzen gestohlene Chloroplasten für ihre Energieversorgung. Zu dieser großen Gruppe zählen etwa die Vertreter der Gattungen *Mesodinium* und *Dinophysis*. Lange glaubten Forscher, sie griffen nur dann auf Fotosynthese als Energiequelle zurück, wenn

Beute knapp ist. Heute wissen wir jedoch, dass sie das viel häufiger tun.

Unter den nicht konstitutiven Mixotrophen gibt es Generalisten und Spezialisten. Zu den Multitalenten gehören etwa die Wimpertierchen der Gattungen *Laboea* und *Strombidium*, die verschiedene Arten von Plankton jagen und sich deren Chloroplasten einverleiben. Allerdings müssen sie die gestohlenen Zellorganellen bereits nach wenigen Tagen durch neue ersetzen. Die meisten Generalisten sind harmlos und gleichzeitig wichtig für den Transfer von Nährstoffen hin zu höheren Ebenen der Nahrungskette wie Fischen.

Die Spezialisten unter den Mixotrophen hingegen sind von einer bestimmten Sorte Plankton abhängig, scheinen sich dafür aber besser daran angepasst zu haben, erbeutete Chloroplasten in ihren Stoffwechsel zu integrieren. Sie halten die fremden Zellorganellen über Wochen oder sogar Monate in Stand. Einige von ihnen, wie *Dinophysis*, produzieren Toxine, die ebenfalls in Schalentieren akkumulieren und für Menschen lebensgefährliche Vergiftungen auslösen können. Im Golf von Mexiko etwa mussten deshalb wiederholt Austernfarmen schließen.

Von Algenblüten bis CO_2-Fixierung: Mixotrophe beeinflussen zahlreiche Prozesse in den Ozeanen

Innerhalb der Spezialisten existiert eine Untergruppe mit besonders außergewöhnlichem Verhalten: Statt lediglich einzelne Teile ihrer Beute zu stehlen, verleiben sie sich ganze Algenkolonien ein und versklaven sie gewissermaßen. Die Algen leben und vermehren sich im Innern des Wirts, in einer nährstoffreichen Umgebung und geschützt vor anderen Räubern. Zu den Wirten gehören unter anderem Foraminiferen (Kammerlinge) und Radiolarien (Strahlentierchen) – Einzeller, die man weltweit im Meer findet. Foraminiferen spielen eine wichtige Rolle für den Kohlenstoffkreislauf, weil sie im Meerwasser gelöstes CO_2 binden und Schalen aus Kalziumkarbonat ($CaCO_3$) bilden, die nach ihrem Tod zum Meeresgrund sinken. Doch auch in dieser Gruppe gibt es Vertreter, die in verschmutzten Küstengewässern giftige Algenblüten bilden, etwa Dinoflagellaten der Gattung *Noctiluca*.

Mixotrophe umfassen also eine enorme Vielfalt mariner Lebensformen: von Pflanzen, die Jagd auf andere Organismen machen, bis hin zu Tieren, die Fotosynthese betreiben; von zwei Mikrometer kleinen Winzlingen bis hin zu ein Millimeter großen Planktonriesen. Und wie sich herausstellte, beeinflussen diese Einzeller den Ozean auf verschiedene Weise.

Im zentralen subtropischen Atlantik beispielsweise, weit entfernt von den Kontinentalküsten, ist das Oberflächenwasser über mehrere tausend Quadratkilometer extrem arm an essenziellen Nährstoffen wie Phosphat oder Eisen. Wissenschaftler vermuteten daher einen starken Wettbewerb um die knappen Ressourcen zwischen Phytoplankton und Bakterien. Der Mikrobiologe Mikhail Zubkov vom National Oceanography Centre in Southampton entdeckte jedoch bei mehreren Forschungsfahrten in der Region eine beachtliche Population an mixotrophen Organismen, die über einen eigenen Fotosyntheseapparat verfügen.

Ausgehend von Zubkovs Messungen entwickelten wir zwei Modelle des Nahrungsnetzes im Nordatlantik: eins, das die traditionelle Vorstellung von konkurrierenden Algen und Bakterien widerspiegelte, und eins, in dem zusätzlich Mixotrophe aktiv waren. Tatsächlich konnte das zweite Modell die während der Schiffsexpeditionen beobachteten Nährstoffverteilungen besser reproduzieren als das erste: Anstatt mit Algen, die ausschließlich Fotosynthese betrieben, um die Nährstoffe zu kämpfen, ernährten sich die Bakterien von energiereichen Zuckern und Aminosäuren, die aus den mixotrophen Einzellern leckten. Letztere fraßen ihrerseits die Bakterien, die mehr Eisen und Phosphat enthielten, als sie selbst dem Meerwasser hätten entziehen können. Ein weiterer Effekt: Berücksichtigte man Mixotrophe in dem Modell, wurde wesentlich mehr CO_2 als Biomasse fixiert. Ohne diese Organismen würde der Ozean also möglicherweise deutlich weniger des Treibhausgases absorbieren.

Eine wichtige Rolle spielen Mixotrophe auch in Küstengewässern, vor allem für die Fischerei. Im Jahr 2017 haben wir ein Planktonmodell für die Nordsee entworfen, das verschiedene dort lebende Mixotrophe berücksichtigt. Wir fanden heraus, dass sich einige kleinere Arten stark vermehren, wenn sie Bakterien fressen. Dadurch hemmen sie das Wachstum von *Phaeocystis*, einer Alge, die oft Blüten in der Nordsee bildet und dabei große Mengen Schaum produziert. Diese Blüten sind zwar nicht giftig, blockieren aber das Sonnenlicht für andere Mikroalgen, die wiederum winzige Fischlarven ernähren. Unsere Studie hat außerdem gezeigt, dass gerade Mixotrophe während der Sommermonate eine reichhaltige Nahrungsquelle für die Larven darstellen.

Mixotrophe Einzeller beeinflussen also zahlreiche Felder der Meeresforschung, vom Klimawandel über den Kohlenstoffkreislauf bis hin zur Vorhersage giftiger Planktonblüten. Die Herausforderung wird nun sein, Echtzeitbeobachtungen und Computermodelle zu kombinieren und zu ermitteln, wie sich verschiedene Arten in unterschiedlichen Ozeanregionen sowie im Wechsel der Jahreszeiten verhalten. Denn der Klimawandel verändert den Lebensraum dieser Organismen. Wir müssen wissen, unter welchen Umweltbedingungen toxische Blüten entstehen oder Algen aufhören zu wachsen, die eine wichtige Stellung im Nahrungsnetz einnehmen. Mit der Kartierung der Verbreitungsgebiete von mixotrophen Einzellern sind erste Schritte in die richtige Richtung getan. Als Nächstes gilt es, Populationsgrößen in Abhängigkeit von Licht, Temperatur und Nährstoffangebot zu bestimmen, denn diese Faktoren kontrollieren die Physiologie des Planktons maßgeblich. ◂

QUELLEN

Flynn, K.J., Mitra, A: Building the »perfect beast«: Modelling mixotrophic plankton. Journal of Plankton Research 31, 2009

Mitra, A. et al.: Defining planktonic protist functional groups on mechanisms for energy and nutrient acquisition; Incorporation of diverse mixotrophic strategies. Protist 167, 2016

Stoecker, D.K. et al.: Mixotrophy in the marine plankton. Annual Review of Marine Science 9, 2017

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN
LITHIUMAKKUS – DIE NÄCHSTE GENERATION

Wiederaufladbare Batterien, die auf Lithium-Metall-Legierungen basieren, könnten bis zu zehnmal leistungsfähiger sein als herkömmliche Lithiumakkus. Eine einfache Version kann man daheim selbst bauen.



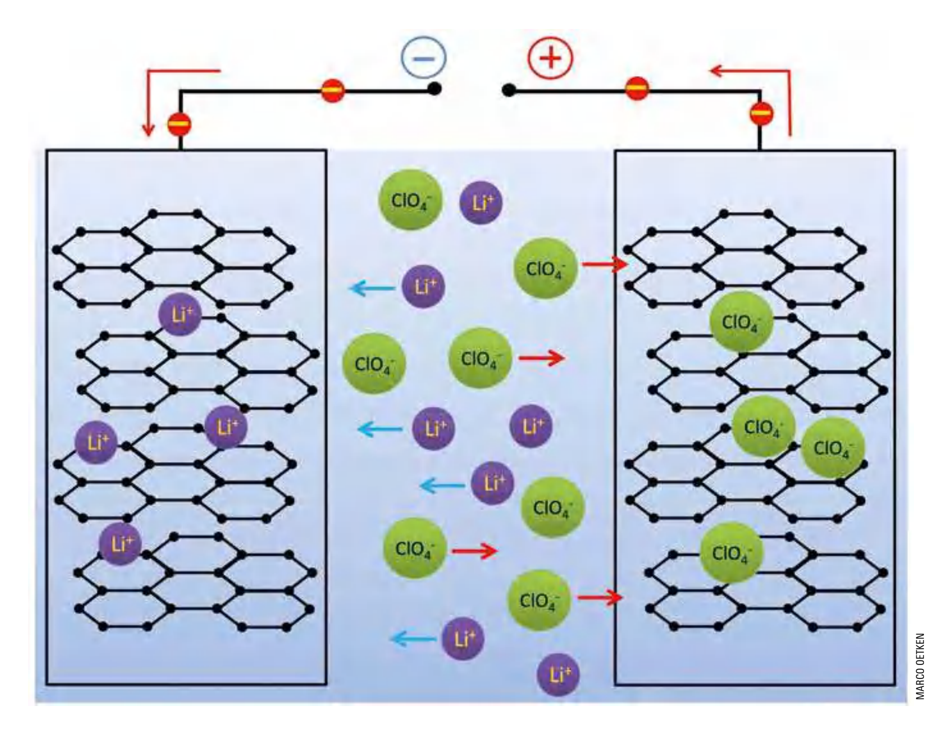

Matthias Ducci (links) ist Professor für Chemie und ihre Didaktik am Institut für Chemie der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe. **Marco Oetken** ist Abteilungsleiter und Lehrstuhlinhaber in der Abteilung Chemie der Pädagogischen Hochschule Freiburg.

▸▸ spektrum.de/artikel/1626468

Ob Handy oder Kamera, Pedelec oder Elektroauto: Die Energie für mobile elektronische Geräte oder Elektrofahrzeuge liefert in der Regel ein Lithium-Ionen-Akkumulator. Kein Wunder, denn dieser Akku ist der momentan leistungsfähigste wiederaufladbare Batterietyp weltweit. Er kann große Mengen an Energie speichern und liefert über viele Lade- und Entladezyklen hinweg zuverlässig Strom. Das Element Lithium bietet ideale Voraussetzungen für den Einsatz in elektrochemischen Batteriesystemen, weil es das leichteste aller Metalle ist und mit ihm große Spannungen erzeugt werden können.

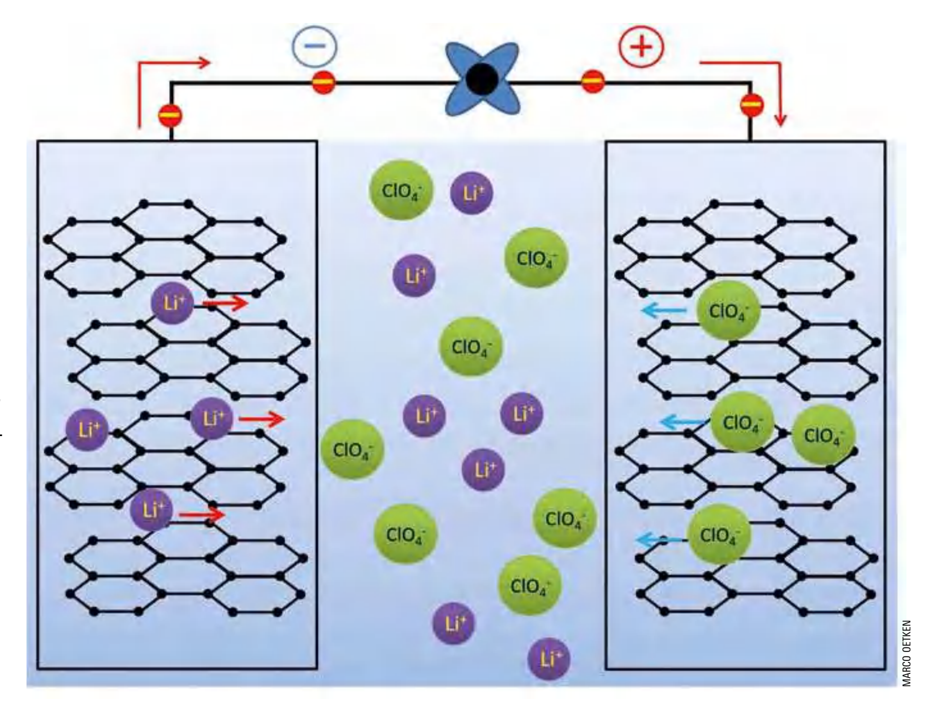
Ein interessanter neuer Ansatz, um die Lithiumakkutechnologie noch zu verbessern, nutzt Lithium-Metall-Legierungen. Speicher auf dieser Basis könnten bis zu zehnmal mehr Leistung bringen als herkömmliche Akkumulatoren.

Hierbei geht es darum, ein neues Material für die Anode, den Minuspol der Akkuzelle, zu entwickeln. In den ersten Lithium-Ionen-Akkus verwendete man dafür Lithium oder ein Metall, an dem sich dieses beim Aufladen abscheidet (sekundäre Lithium-Metall-Akkumulatoren). In jüngerer Zeit stößt Lithiummetall als Anodenmaterial bei der Entwicklung neuer Batteriesysteme zwar wieder auf Interesse, es konnte sich jedoch bisher nicht durchsetzen, unter anderem auf Grund von Sicherheitsrisiken. Lithium scheidet sich nämlich nicht gleichmäßig, sondern in astarti-



Im Dual-Carbon-Akkumulator bestehen beide Elektroden aus Graphit. Beim Laden werden Lithiumionen (Li^+) in die Anode (links) und Perchlorationen (ClO_4^-) in die Kathode (rechts) eingelagert.

Beim Entladen des Dual-Carbon-Akkumulators gehen Lithium- und Perchlorationen wieder in Lösung.



gen Fortsätzen am Metall ab. Bilden sich solche »Dendritenäste« von der Anode bis zur Kathode (Pluspol) aus, schließen sie die Zelle kurz und machen sie unbrauchbar. Da die Akkus eine oft leicht entflammbare Elektrolytlösung enthalten, explodiert in der Folge meist der ganze Akku (mehr zur Funktionsweise dieser Lithium-Metall-Akkus in **Spektrum** der Wissenschaft Juli 2016, S. 76).

Es bedurfte daher eines Tricks, um den Lithium-Ionen-Akku Ende des 20. Jahrhunderts auf die Zielgerade zu führen: Statt metallischen Lithiums setzte man Graphit als Anodenmaterial ein. Dieses kann Lithiumionen zwischen die einzelnen, lose zusammengehaltenen Graphitschichten ein- und wieder auslagern (dieser Vorgang wird als Interkalation beziehungsweise Deinterkalation bezeichnet). Auf dieser Technologie basieren die heute eingesetzten Lithium-Ionen-Akkus.

Diese bestehen aus einer Graphitelektrode, die beim Laden als Minuspol geschaltet wird (Anode), und einer als Pluspol geschalteten Elektrode (Kathode) aus Mischmetalloxiden wie beispielsweise Lithiummangandioxid ($LiMnO_2$) oder Lithiumkobaltdioxid ($LiCoO_2$). Beide Elektroden befinden sich in einer Lösung eines lithiumhaltigen Salzes – zum Beispiel Lithiumperchlorat ($LiClO_4$) – in einem organischen Lösungsmittel (Elektrolytlösung). Dank der Elektrolytlösung können Ionen zwischen den Elektroden hin- und herwandern. Während des Ladevorgangs wird an der Kathode durch den Entzug je eines Elektrons Mangan(III) zu Mangan(IV) beziehungsweise Kobalt(III) zu Kobalt(IV) oxidiert; um die entstehende positive Ladung wieder auszugleichen, lagert die Kathode gleichzeitig ein Lithiumion aus ihrem Schichtgitter aus. In die Anode hingegen werden beim Laden sozusagen Elektronen hineingepumpt. Zum Ladungsausgleich wandern positiv geladene Lithiumionen in das Graphitgitter und lagern sich dort zwischen die Schichten ein. Beim Entladevorgang werden die in die Anode eingelagerten Lithiumionen wieder aus- und in die Kathode eingebaut. An den Elektroden finden formal folgende Reaktionen statt:

Minuspol:
$C_n + x\,Li^+ + x\,e^- \rightarrow Li^+_xC_n^{x-}$

Pluspol:
$Li^+Mn^{+III}O_2 \rightarrow Li^+_{1-x}Mn^{+IV}O_2 + x\,e^- + x\,Li^+$

Gesamt:
$Li^+Mn^{+III}O_2 + C_n \rightarrow Li^+_{1-x}Mn^{+IV}O_2 + Li^+_xC_n^{x-}$

Die kommerziell verwendeten Kathodenmaterialien sind jedoch giftig; darüber hinaus wird künftig voraussichtlich die Verfügbarkeit von Kobalt ein Problem, denn das Metall könnte nach Schätzungen von Experten bei steigender Nachfrage nach Akkus in den nächsten Jahrzehnten knapp werden. Dieses Problem umgehen so genannte Dual-Carbon-Akkumulatoren, in denen Anode sowie Kathode aus Graphit bestehen. Das funktioniert, weil Graphit nicht nur Lithiumionen ein- und wieder auslagern kann, sondern auch Anionen, also negativ geladene Ionen. Indem Lithiumionen in die Anode einerseits und Anionen in die Kathode andererseits eingebaut werden, erreicht man eine Potenzialdifferenz zwischen den Elektroden. In solch einem Akku mit zwei Graphitelektroden, die in eine Lithiumperchloratlösung eintauchen, laufen folgende Lade- und Entladevorgänge ab:

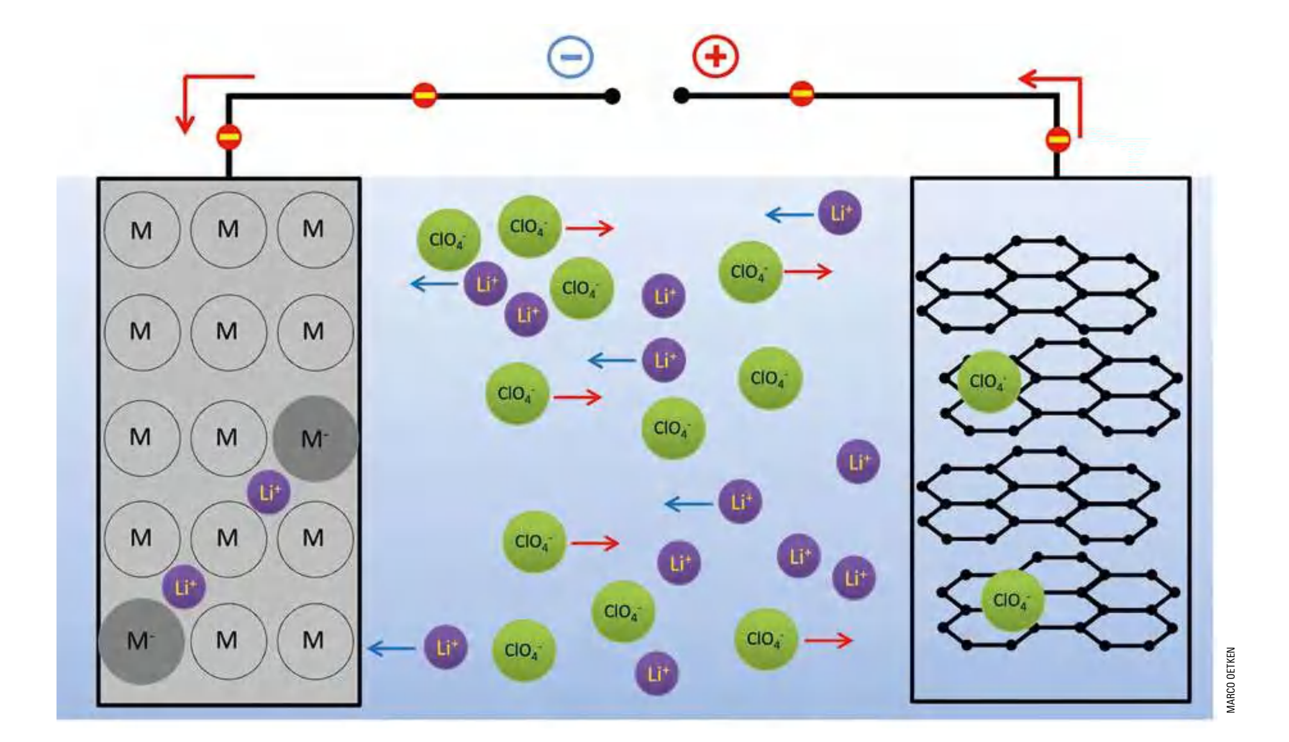
Minuspol:
$C_n + x\,Li^+ + x\,e^- \rightarrow Li^+_xC_n^{x-}$

Pluspol:
$C_n + x\,ClO_4^- \rightarrow C_n^{x+}(ClO_4^-)_x + x\,e^-$

Gesamt:
$2\,C_n + x\,LiClO_4 \rightarrow Li^+_xC_n^{x-} + C_n^{x+}(ClO_4^-)_x$

Beim Laden wird die Anode negativ aufgeladen, dadurch lagern sich, analog zum herkömmlichen Akku, Lithiumionen zwischen die Graphitschichten ein. An der Kathode werden nun in Folge des Entzugs von Elektronen ebenfalls Ionen – in diesem Fall Perchloratanionen – eingebaut. Beim Entladen laufen diese Prozesse umgekehrt ab, und Lithium- sowie Perchlorationen wandern zurück in die Lösung (siehe Abbildungen links und oben).

Trotz seines charmanten Ansatzes besitzt der Dual-Carbon-Akku allerdings eine geringere Energiedichte als



Beim Laden eines Lithiumionen-Legierungsakkus werden Lithiumionen (Li^+) in die Metallanode (links) einlegiert. Gleichzeitig lagern sich Perchlorationen (ClO_4^-) in die Graphitelektrode (rechts) ein. Beim Entladen (nicht gezeigt) gehen die Ionen wieder in Lösung.

die zurzeit kommerziell eingesetzten Akkus und bringt dadurch weniger Leistung. Daher hat er bisher noch keine nennenswerte Verbreitung gefunden.

Den Schlüssel zu höherer Leistungsfähigkeit sehen Wissenschaftler derzeit in neuen Anodenmaterialien. Mit diesen, so die Hoffnung, könnten auch Elektroautos endlich höhere Reichweiten erzielen. Viel versprechende Kandidaten dafür sind Anoden aus Lithium-Metall-Legierungen.

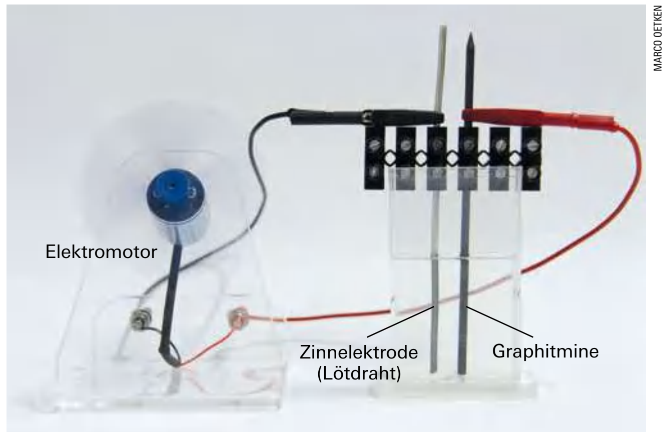
Interessanterweise können sich Lithiumionen nämlich nicht nur in das Graphitgitter ein- und wieder auslagern: Lithium kann mit zahlreichen Metallen (M) Legierungen der Form Li_xM bilden, die auch bei Raumtemperatur Lithiumionen aufnehmen und wieder abgeben können. Als zu legierende Metalle – so genannte Basismetalle – kommen beispielsweise Aluminium, Blei, Silizium oder Zinn in Frage, aber auch Edelmetalle wie Platin, Silber oder Gold. Die Legierungsbildung kann man folgendermaßen verdeutlichen:

$$M + x\,Li^+ + x\,e^- \rightarrow Li_xM$$

Die gebildeten Legierungen weisen häufig einen deutlichen ionischen Charakter auf, das heißt, sie bestehen aus positiv geladenen Lithiumionen und negativ geladenen Basismetallionen, entsprechend der Formel $Li^+_xM^{x-}$. Dadurch können die Lithiumteilchen in der jeweiligen Legierung bisweilen sogar dichter zusammengepackt sein als im elementaren, metallischen Lithium. Das ist ein wichtiger Punkt, denn mit der Packungsdichte der Ionen steigt auch die Energiedichte des Akkus. Verwendet man Silizium oder Zinn als zu legierendes Metall, so kommen auf ein Basismetallion sogar 4,4 Lithiumionen, so dass Verbindungen der Formeln $Si_1Li_{4,4}$ beziehungsweise $Sn_1Li_{4,4}$ entstehen. Zum Vergleich: In der Graphitanode eines herkömmlichen Akkus beträgt das Verhältnis von Lithium zu Kohlenstoff maximal eins zu sechs (als Formel: Li_1C_6). Die Energie, die eine entsprechende Legierungselektrode speichern kann, ist also deutlich größer, da in dasselbe Volumen mehr Lithiumionen passen. Ein entsprechender Akkumulator könnte auf diese Weise bis zu zehnmal leistungsfähiger sein als die derzeit üblichen Systeme.

Das Elektrodenpotenzial des zu legierenden Metalls wird bei einem Ladevorgang durch das eingebaute Lithium stark in den negativen Bereich verschoben – je nach Legierung nahe an den Wert des metallischen Lithiums (das Potenzial der Graphitanode liegt nach dem Ladevorgang in einem ähnlichen Bereich). Damit wird aus dem

Mit dem selbst gebauten Lithiumionen-Legierungsakkumulator kann man einen kleinen Elektromotor einige Minuten lang betreiben. Man sieht die Legierung, die sich gebildet hat, als dunklen Überzug auf dem Lötdraht.



eher reaktionsträgen Ausgangsmetall ein sehr reaktives Anodenmaterial, denn je negativer das Potenzial, desto reaktiver ist die Elektrode. So kann das Potenzial einer Zinnelektrode von gerade einmal -0,14 Volt – gemessen gegen den üblichen Standard, die Normalwasserstoffelektrode (NHE) – durch das elektrochemische »Einlegieren« von Lithiumionen auf fast -2,6 Volt gegen NHE abgesenkt werden. Das ist schon recht nahe am Potenzial des metallischen Lithiums, das mit -3,05 Volt gegen NHE Spitzenreiter ist.

Das Basismetall (M) wird während des Ladevorgangs als Minuspol geschaltet, die Graphitelektrode als Pluspol. Durch die Spannungsquelle werden Elektronen in das Metall »hineingepumpt«, und dieses lädt sich entsprechend negativ auf. Zur Wahrung der elektrischen Neutralität wandern aus dem Elektrolyten Lithiumionen in das Metall und bilden mit ihm eine Legierung. Als Leitsalz dient wie oben beispielsweise Lithiumperchlorat. Beim Einlegieren werden jedoch nicht die Lithiumionen zu Atomen reduziert, sondern die Basismetallatome zu Metallanionen (M^{x-}), so dass eine Legierung mit der Formel $Li^{+}_{x}M^{x-}$ entsteht. Auf der Kathodenseite werden durch die Gleichspannungsquelle Elektronen abgezogen, die Graphitelektrode lädt sich dadurch positiv auf. Diese positive Ladung gleicht das System wieder aus, indem Perchlorationen aus dem Elektrolyten in den Graphit wandern und sich dort einlagern (siehe Bild links).

Beim Entladevorgang laufen die oben beschriebenen Vorgänge in entgegengesetzter Richtung ab. Die Redoxreaktionen kann man wie folgt formulieren:

Minuspol:

$M + x\,Li^{+} + x\,e^{-} \rightarrow Li^{+}_{x}M^{x-}$

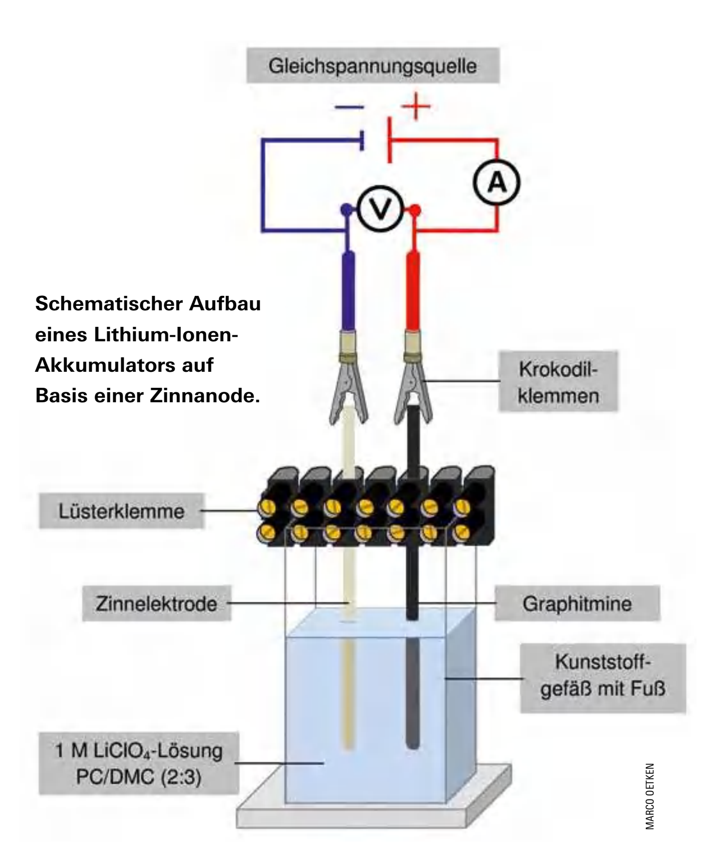
Pluspol:

$C_n + x\,ClO_4^{-} \rightarrow C_n^{x+}(ClO_4^{-})_x + x\,e^{-}$

Diese neue Entwicklung auf dem Gebiet der elektrochemischen Speichersysteme kann man daheim selbst nachstellen (die exakten Anleitungen sind online unter spektrum.de/artikel/1626468 zu finden):

Ein einfacher Lötdraht aus Zinn (zum Beispiel aus dem Baumarkt) und eine Graphitmine tauchen rund vier Zentimeter tief in eine Elektrolytlösung aus Lithiumperchlorat ($LiClO_4$) in einer Mischung aus Dimethylcarbonat (DMC) und Propylencarbonat (PC) ein. Als Kunststoffgefäß dient eine handelsübliche Tic-Tac-Dose. Der Lötdraht wird für den Ladevorgang als Minuspol (Anode) und die Graphitmine als Pluspol (Kathode) geschaltet. Für rund fünf Minuten wird bei einer Spannung von etwa 4,8 Volt geladen. Die Spannung sollte 5 Volt nicht übersteigen, da sich sonst elementares Lithium abscheiden kann. Nach dem Laden zeigt die Zelle eine Spannung von etwa 4,3 Volt an. Nun kann man einen kleinen Motor – zum Beispiel einen Glockenankermotor – an die Zelle anschließen und für mehrere Minuten betreiben.

Die gemessene Spannung entsteht durch die oben beschriebenen Vorgänge – die Legierungsbildung an der Anode sowie die Einlagerung von Anionen in die Kathode.



Schematischer Aufbau eines Lithium-Ionen-Akkumulators auf Basis einer Zinnanode.

Der erste Vorgang ist während des Experiments direkt zu beobachten: Beim Laden bildet sich ein dunkler Überzug auf dem Lötdraht.

Dieser Selbstbauakku mit leicht erhältlichen Materialien wie Lötdraht, einer Bleistiftmine und Lüsterklemmenfixierung in einer kleinen Dose veranschaulicht auf einfache Weise eine viel versprechende Strategie in der aktuellen Batterieforschung. Knackpunkt ist momentan noch, dass sich die bislang untersuchten Anodenmaterialien beim Laden stark ausdehnen. Das beansprucht das Material und macht es nach wenigen Ladezyklen unbrauchbar. Wenn man einen Weg findet, um diesen Stress für die Anodenmaterialien zu reduzieren oder ganz zu unterbinden, könnte eine neue Generation von Lithium-Ionen-Akkus entstehen. ◂

QUELLEN

Alliata, D. et al.: Anion intercalation into highly oriented pyrolytic graphite studied by electrochemical atomic force microscopy. Electrochemistry Communications 1, 1999

Crowther, O., West, A.C.: Effect of electrolyte composition on lithium dendrite growth. Journal of the electrochemical society 155, 2008

Hasselmann, M., Oetken, M.: Elektrische Energie aus dem Kohlenstoffsandwich – Lithium-Ionen-Akkumulatoren auf Basis redoxamphoterer Graphitinterkalationselektroden. Chemkon 18, 2011

Hasselmann, M., Oetken, M.: Elektrochemie – Perspektiven nachhaltiger Energieversorgung Teil 1. Chemie und Schule 4, 2012

Hasselmann, M., Oetken, M.: Ein Akku macht »blau«!. Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule 2, 2013

OKTONIONEN
ACHT DIMENSIONEN FÜR DAS STANDARDMODELL

Aktuelle Erkenntnisse bestärken den jahrzehntealten Verdacht, dass die Eigenschaften fundamentaler Teilchen und Kräfte von seltsamen achtdimensionalen Zahlen herrühren, den »Oktonionen«.



Natalie Wolchover ist Journalistin und Physikerin in New York. Sie schreibt regelmäßig für das »Quanta Magazine«.

⏩ spektrum.de/artikel/1626470

2014 mietete die damals 35-jährige Kanadierin Cohl Furey einen Wagen in Waterloo und fuhr damit sechs Stunden nach Süden, bis sie die Pennsylvania State University erreichte. Vor über 40 Jahren vermutete der dort ansässige Physikprofessor Murat Günaydin einen Zusammenhang zwischen der Teilchenphysik und einem mathematischen Gebiet, aber seine Arbeiten gerieten größtenteils in Vergessenheit. Furey glaubte nun einen Weg gefunden zu haben, auf seine Vermutung aufzubauen. Sie konnte es kaum erwarten, Günaydin zu treffen und ihm von ihren Ideen zu erzählen.

Auch wenn der Gedanke bisher nicht viele Anhänger fand, geistert er seit einigen Jahrzehnten unter Physikern und Mathematikern herum: dass bizarre achtdimensionale Zahlen, so genannte Oktonionen, die fundamentalen Kräfte und Teilchen unserer Welt erklären könnten.

Das einfachste und geläufigste Zahlensystem begegnet den meisten Menschen schon in der Schule: die reellen Zahlen. Sie enthalten jeden Punkt eines Zahlenstrahls, wie 1, π oder minus 83,77. Doch die reellen Zahlen sind erst der Anfang. Schon im 16. Jahrhundert führte der italienische Gelehrte Gerolamo Cardano die Wurzel aus minus eins ein, um komplizierte Gleichungssysteme effizienter zu lösen. Diese Einheit hat sich als »imaginäre Zahl« i in der Mathematik durchgesetzt. Zusammen mit den reellen Zahlen bildet sie das Gebilde der »komplexen Zahlen«. Ein Element daraus lässt sich als $a + bi$ schreiben, wobei a und b reell sind. Geometrisch gesehen stellt eine komplexe Zahl einen Punkt in der Ebene dar: mit a als x- und b als y-Koordinate. Die Grundrechenarten, das Addieren, Subtrahieren, Multiplizieren und Dividieren, entsprechen geometrischen Transformationen, die einen Punkt in der Ebene verschieben und drehen.

Wenn sich die komplexen Zahlen als Paare reeller Zahlen (a, b) auffassen lassen, könnte man dann das Spiel weitertreiben? Dieser Gedanke ließ den irischen Mathematiker William Rowan Hamilton nicht mehr los. Über Jahre hinweg versuchte er, die vier Grundrechenarten mit Tripeln reeller Zahlen zu definieren. Doch er stieß dabei immer wieder auf Widersprüche. Im Jahr 1843 gelang ihm schließlich der Durchbruch: Indem er Paare komplexer Zahlen bildete, fand er die Rechenregeln für vierdimensionale »Quaternionen«. Von seinem Fund berauscht, zögerte er nicht lange und meißelte seine Formel in die Broome Bridge von Dublin, wo man bis heute eine den Quaternionen gewidmete Gedenktafel findet.

Als Hamilton seinem Freund und Kollegen John Graves von seiner Entdeckung erzählte, sah dieser keinen Grund dafür, hier aufzuhören. Graves paarte Quaternionen miteinander und stieß so auf Oktonionen – Koordinaten eines abstrakten achtdimensionalen Raums, die man addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren kann.

Danach ist allerdings Schluss. Der deutsche Mathematiker Adolf Hurwitz bewies 1898, dass die reellen und die komplexen Zahlen zusammen mit den Quaternionen und

AUF EINEN BLICK
ACHTDIMENSIONALE ÜBERRASCHUNG

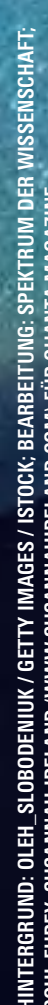
1. Neben den reellen und den komplexen Zahlen gibt es lediglich zwei weitere Zahlensysteme, die man addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren kann.

2. Eines davon bilden die achtdimensionalen Oktonionen, die ungewöhnliche mathematische Eigenschaften haben.

3. Ein oktonionisches Modell der Natur könnte die willkürlich anmutenden Teilcheneigenschaften und die fundamentalen Kräfte unserer Welt erklären.

Die »Fano-Ebene« beschreibt die Multiplikationsgesetze von Oktonionen, einem achtdimensionalen Zahlensystem mit außergewöhnlichen Eigenschaften. Die Physikerin Cohl Furey vertritt die Ansicht, dass sie unsere Naturgesetze erklären.





den Oktonionen die einzigen Zahlensysteme sind, für die man alle vier Grundrechenarten auf Basis der reellen Zahlen definieren kann. Bei höherdimensionalen Zahlen versagt die Division: Es tauchen »Nullteiler« auf, weil das Produkt zweier von null verschiedener Zahlen gleich null sein kann.

Die drei »Divisionsalgebren« reelle, komplexe Zahlen sowie Quaternionen sollten das mathematische Fundament der Physik des 20. Jahrhunderts bilden. Für die Quantenmechanik benötigt man komplexe Zahlen, während die Quaternionen Albert Einsteins spezieller Relativitätstheorie zu Grunde liegen. Das brachte einige Forscher dazu, auch über die wenig verstandenen Oktonionen nachzudenken (siehe **Spektrum** Oktober 2011, S. 54). Wenn sich die übrigen Zahlensysteme als so nützlich erwiesen, könnten auch die bizarren achtdimensionalen Gebilde einige Geheimnisse unseres Universums enthüllen. Deshalb üben sie eine große Anziehungskraft auf Wissenschaftler aus. »Oktonionen sind für die Physik, was die Sirenen für Odysseus waren«, sagt der Stringtheoretiker Pierre Ramond von der University of Florida.

Einen ersten Hinweis auf die Bedeutung von Oktonionen fand Günaydin während seiner Promotion in Yale, als er 1973 mit seinem damaligen Betreuer Feza Gürsey eine überraschende Verbindung zwischen ihnen und der starken Kernkraft fand. Aber die erste Welle der Aufregung ebbte unter Forschern schnell ab. Zu dieser Zeit beschäftigten sich fast alle Teilchenphysiker mit dem damals neu entwickelten Standardmodell, einer Theorie, die bis heute die Welt subatomarer Teilchen zuverlässig erfasst. Sie enthält alle bekannten fundamentalen Kräfte – bis auf die Gravitation, die nicht in den Rahmen zu passen scheint.

Auch wenn das Standardmodell die Natur sehr gut beschreibt, bleiben viele Fragen offen, unter anderem: Warum haben die Teilchen ihre willkürlich erscheinenden Eigenschaften? Weshalb passt die Schwerkraft nicht in das Bild? Anstatt zu Stift und Papier zu greifen und die Antworten in mathematischen Strukturen zu suchen, setzten die meisten Physiker ihre Hoffnungen in Experimente an leistungsfähigen Teilchenbeschleunigern wie dem LHC in Genf. Sie erwarteten, dass die Detektoren dort schon bald neue Teilchen finden würden, die das Standardmodell nicht vorhersagt. Diese Partikel sollten ihnen dann den Weg zu einer neuen Theorie weisen, in der die Schwerkraft mit den übrigen drei fundamentalen Kräften endlich vereint werden könnte. »Sie stellten sich vor, dass die Lösung einfach so vom Himmel fallen würde. Dabei steckt sie vielleicht in den Teilen der Theorie, die wir bereits kennen«, sagt Latham Boyle, ein theoretischer Physiker am Perimeter Institute of Theoretical Physics in Waterloo.

Seit Jahrzehnten suchen die Wissenschaftler nach neuen Teilchen, doch bisher ohne Erfolg. Unterdessen hat die seltsame Schönheit der Oktonionen immer mehr unkonventionelle Forscher angezogen, einschließlich der kanadischen Physikerin Cohl Furey.

Als sie 2014 im Büro von Günaydin auftauchte, musste sie mit ihren strahlend blauen Augen und ihrer silbernen Ponyfrisur auf ihn gewirkt haben wie von einem anderen Stern: Während sie Günaydins Tafel mit mathematischen Symbolen vollkritzelte, erklärte sie ihm, dass sie Oktonionen nicht nur mit der starken, sondern auch mit der elektromagnetischen Kraft verbinden könne. »Anschließend war es aber schwerer als erwartet, mit ihm über die Details zu diskutieren«, erinnert sich Furey. »Ich kam kaum noch zu Wort.«

Seit seiner Doktorarbeit in den 1970er Jahren hatte sich Günaydin unaufhörlich mit den seltsamen achtdimensionalen Zahlen beschäftigt. Dabei widmete er sich einigen physikalischen Theorien, die alle vier Grundkräfte zu vereinen suchen und anscheinend mit Oktonionen zusammenhängen. Mit seiner außergewöhnlichen Forschung wurde Günaydin allerdings zum wissenschaftlichen Außenseiter. Um Furey vor dem gleichen Schicksal zu bewahren, riet er ihr damals, sich ein anderes Projekt für ihre Doktorarbeit zu suchen. Die Oktonionen könnten mehr Türen verschließen als öffnen.

Aber Furey wollte nicht aufgeben. Sie war zutiefst überzeugt davon, dass den bekannten Naturgesetzen Oktonionen und andere Divisionsalgebren zu Grunde liegen müssten. Falls sie keine Stelle in der Wissenschaft finden sollte, sagte sie einem Kollegen, dann würde sie sich eben ihr Akkordeon schnappen und nach New Orleans fahren. Dort könnte sie dann als Straßenmusikerin ihr Leben finanzieren, um ihrer Forschung weiter nachzugehen. Glücklicherweise fand Furey stattdessen eine Anstellung als Postdoc an der britischen University of Cambridge. Dort hat sie inzwischen einige Ergebnisse produziert, die das Standardmodell und Oktonionen weiter miteinander verflechten. Experten ordnen ihre Arbeiten als seltsam faszinierend und elegant ein. »Sie hat bedeutende Schritte unternommen, um einige wirklich tiefgründige physikalische Rätsel zu lösen«, kommentiert Shadi Tahvildar-Zadeh, ein mathematischer Physiker an der Rutgers University, der Furey in Cambridge besuchte, nachdem er online auf einige Videos gestoßen war, in denen sie ihre Arbeit vorstellt.

Zwischen Mixed-Martial-Arts-Kämpfen und achtdimensionalen Zahlensystemen

Bisher gelang es Furey allerdings nicht, eine oktonionische Theorie zu finden, die gleichzeitig alle Teilchen und Kräfte des Standardmodells enthält – und die Schwerkraft hat sie noch überhaupt nicht angerührt. Es gebe einfach enorm viele Möglichkeiten, die mathematischen Objekte miteinander zu verschmelzen, betont sie. Experten zufolge ist es noch zu früh, um einzuschätzen, wie (und ob) man Oktonionen mit anderen Divisionsalgebren so verbinden kann, dass eine physikalisch sinnvolle Theorie dabei herauskommt.

»Sie hat einige interessante Verbindungen gefunden«, findet Michael Duff, ein führender Stringtheoretiker am Imperial College London, der ebenfalls die Rolle von Oktonionen in verschiedenen physikalischen Theorien studiert hat. »Es lohnt sich meiner Meinung nach, weiterzumachen, doch es ist schwer zu sagen, ob sich daraus eine passende Beschreibung des Standardmodells ergibt. Das wäre natürlich eine bahnbrechende Entdeckung.«

Im Juni 2018 reiste ich nach Cambridge und traf mich dort mit Furey. Wir verabredeten uns an der Pförtnerloge der Universität, die zum berühmten Trinity Hall College führt, wo unter anderem Stephen Hawking studiert hat. Ich war von ihrer Erscheinung überrascht: Die kleine,

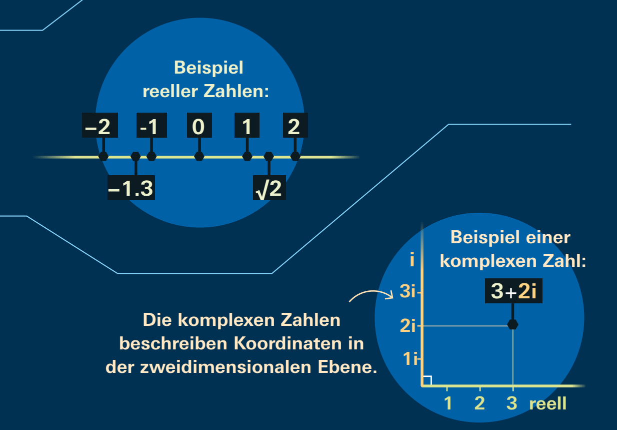
Vier besondere Zahlensysteme

Wenn man die vertrauten reellen Zahlen addiert, subtrahiert, multipliziert oder dividiert, ist das Ergebnis auch wieder eine reelle Zahl. Es gibt genau drei weitere auf den reellen Zahlen basierende Zahlensysteme, die diese Eigenschaft teilen. Einige Physiker glauben, dass die vier »Divisionsalgebren« der Schlüssel sind, um die Naturgesetze zu verstehen.

Reelle Zahlen

alle Zahlen auf dem eindimensionalen Zahlenstrahl

Eine ausschlaggebende Eigenschaft ist, dass ihr **Quadrat niemals negativ** ist. Zum Beispiel: $2^2 = 4$ und $(-2)^2 = 4$



Komplexe Zahlen

reelle Zahlen, die zusätzlich um die »imaginäre« Einheit i *erweitert sind*

Charakteristisch ist, dass das **Quadrat von i negativ** ist. Beispiel: $i^2 = -1$

Quaternionen

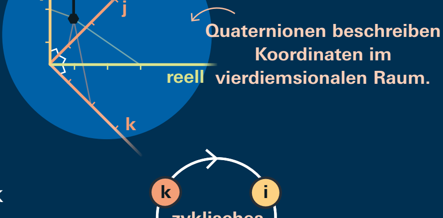
Erweiterung der komplexen Zahlen um zwei weitere Einheiten j *und* k

Das Produkt von Quaternionen ist **nichtkommutativ**: Vertauscht man die Reihenfolge der Elemente, erhält man ein anderes Ergebnis.

Die Multiplikation folgt einem zyklischen Muster, wobei das Produkt zweier benachbarter Elemente das dritte ergibt:

Folgt man der Pfeilrichtung, erhält man ein **positives** Ergebnis: $i \cdot j = k$

Entgegen der Pfeilrichtung wird es **negativ**: $j \cdot i = -k$

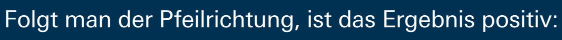


Oktonionen

Oktonionen entspringen den reellen Zahlen, denen man sieben zusätzliche Einheiten hinzufügt: e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6 *und* e_7 *(*e_1, e_2 *und* e_4 *sind mit den quaternionischen Einheiten* i, j *und* k *vergleichbar)*

Das Produkt von Oktonionen ist **nichtassoziativ**, das heißt, die Gruppierung der Elemente ist entscheidend.

Ihre Multiplikationsgesetze sind durch die »Fano-Ebene« definiert. Multipliziert man zwei Elemente entlang einer Linie, ergibt sich daraus die dritte Einheit entlang der Pfeilrichtung. Dabei muss man sich zusätzliche Verbindungen vorstellen, die eine Schleife entlang jeder Linie bilden (siehe die beispielhaft gestrichelte Linie).



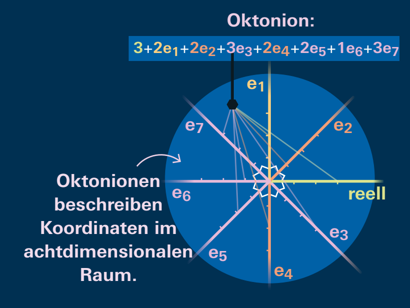
Folgt man der Pfeilrichtung, ist das Ergebnis positiv: Zum Beispiel: $e_5 \cdot e_2 = e_3$ und $e_6 \cdot e_3 = e_4$

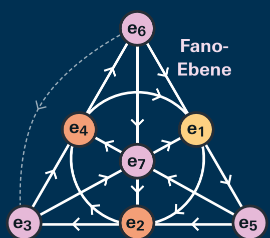
Entgegen der Pfeilrichtung ist es negativ: Zum Beispiel: $e_1 \cdot e_7 = -e_3$ und $e_6 \cdot e_5 = -e_1$

Um zu erkennen, dass Oktonionen nichtassoziativ sind, multipliziert man drei Elemente miteinander, etwa e_5, e_2 und e_4:

Eine Gruppierung ergibt: $(e_5 \cdot e_2) \cdot e_4 = e_3 \cdot e_4 = e_6$

Aus der anderen folgt aber: $e_5 \cdot (e_2 \cdot e_4) = e_5 \cdot e_1 = -e_6$





LUCY READING-IKKANDA / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

muskulöse Gestalt, bekleidet mit einem ärmellosen schwarzen Shirt, das Prellungen von Mixed-Martial-Arts-Kämpfen enthüllte, aufgerollten Jeans, bedruckten Cartoon-Socken und Sneakers der Marke Vegetarian Shoes, erinnerte mich mehr an einen Hipster aus Vancouver als an das überirdisch anmutende Wesen aus den wissenschaftlichen Onlinevideos. Der Tag war ungewöhnlich sonnig, und so beschlossen wir, über die Rasenflächen der Universität am Rande des Flusses Cam zu schlendern. An einem anderen Tag hätte ich sie vielleicht auf ihrer violetten Yogamatte auf dem Rasen des Campus entdeckt, wo sie gern an ihren Berechnungen tüftelt.

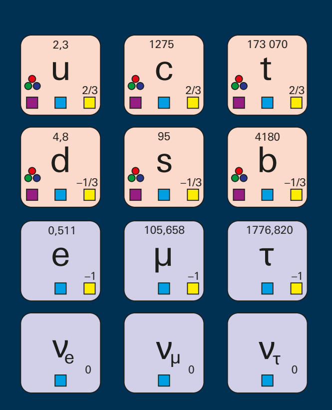
Furey erinnert sich noch genau an den Augenblick, als sie erstmals ihr Interesse für Physik entdeckte. In der kanadischen Highschool erklärte ihr Lehrer, dass nur vier fundamentale Kräfte alle komplexen Vorgänge der Welt erklären. Sie erfuhr, dass Physiker seit den 1970er Jahren versuchen, sie alle in einer einzigen Theorie zu vereinen. »Das war einfach das Schönste, was ich je gehört hatte«, sagt Furey zu mir. Sie hatte eine ähnliche Empfindung, als sie ein paar Jahre später als Studentin der Fraser University of Vancouver die vier Divisionsalgebren kennen lernte. Gäbe es ein einziges solches Zahlensystem oder unendlich viele, würde man sich nicht besonders wundern. »Aber genau vier?«, erinnert sie sich. »Wie eigenartig.«

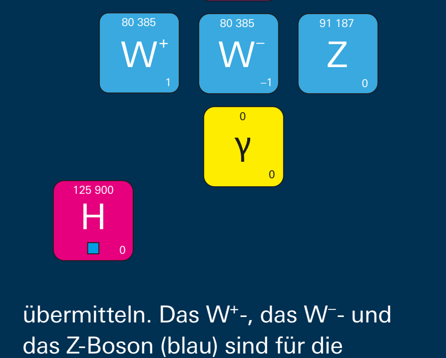
Allerdings sollte es noch einige Jahre dauern, bis die seltsamen Strukturen ihre Leidenschaft endgültig entfachten. Furey unterbrach ihr Studium immer wieder, um in Skihütten zu arbeiten, im Ausland zu kellnern und ihrem intensiven Training als Mixed-Martial-Arts-Kämpferin nachzugehen. Als sie aber irgendwann in einem Kurs für fortgeschrittene Geometrie saß, liefen ihr die Divisionsalgebren wieder über den Weg, und sie erfuhr, wie eigenartig sie wirklich sind.

Jedes Mal, wenn man ein Zahlensystem paart, um zum nächsten zu gelangen – von den reellen zu den komplexen Zahlen, von diesen zu den Quaternionen und schließlich zu den Oktonionen –, verliert man eine Eigenschaft. Während man reelle Zahlen mühelos ihrer Größe nach ordnen kann, gibt es in der komplexen Ebene kein solches Konzept. Man kann nicht beurteilen, ob eine komplexe Zahl größer ist als eine andere.

Beim Übergang zu den Quaternionen verlieren die Zahlen ihre Kommutativität, das heißt, für sie ist $a \cdot b$ ungleich

Standardmodell der Teilchenphysik





Das Standardmodell enthält alle bisher bekannten Elementarteilchen. Links oben sind die sechs Quarks Up (u), Down (d), Charm (c), Strange (s), Top (t) und Bottom oder auch Beautiful (b) verzeichnet. Sie können jeweils drei verschiedene Farbladungen besitzen (Rot, Grün oder Blau). Diese Ladung bestimmt, wie sie an Gluonen (g) koppeln, die selbst zwei Farbladungen tragen. Neben der durch die Gluonen vermittelten starken Wechselwirkung (purpur) unterliegen die Quarks auch der schwachen Kernkraft (blau) und dem Elektromagnetismus (gelb). Ihre elektrische Ladung beträgt entweder ⅔ oder –⅓ der Elektronenladung. Die Masse der sechs Quarks variiert stark, vom leichtesten Up-Quark mit 2,3 MeV/c² bis zum schweren Top-Quark mit über 170 GeV/c².

Außerdem gibt es sechs verschiedene Leptonen: das Elektron (e), das Myon (μ), das Tauon (τ) und für jedes dieser Teilchen ein dazugehöriges Neutrino (ν). Sie unterliegen alle der schwachen Wechselwirkung (blau), und bis auf die drei Neutrinos haben sie eine negative Elektronenladung. Wie bei den Quarks schwankt auch ihre Masse: von 511 keV/c² des leichten Elektrons bis zu mehr als 1,7 GeV/c² des schweren Tauons. Die Masse der Neutrinos ist tatsächlich so klein, dass sie bisher noch nicht bestimmt werden konnte.

Quarks und Leptonen bilden zusammen drei Teilchenfamilien, die sich bis auf ihre Massen nicht voneinander unterscheiden. Sie wirken damit wie drei praktisch identische Kopien.

Neben den Gluonen befinden sich in der rechten Spalte die übrigen Teilchen, welche die fundamentalen Kräfte des Standardmodells übermitteln. Das W⁺-, das W⁻- und das Z-Boson (blau) sind für die schwache Kernkraft verantwortlich, die radioaktive Zerfälle bewirkt. Das Photon (gelb) übermittelt die elektromagnetische Kraft. Das Higgs-Boson (pink) unterscheidet sich von seinen Artgenossen. Es hängt nicht mit einer fundamentalen Kraft zusammen, sondern verleiht den Teilchen ihre Masse. Außerdem unterliegt es der schwachen Wechselwirkung.

Um das Standardmodell zu vervollständigen, kommen noch die Antiteilchen der Quarks und der Leptonen hinzu, die sich lediglich durch das Vorzeichen ihrer elektrischen Ladung von den ursprünglichen Partikeln unterscheiden.

$b \cdot a$. Anschaulich gesehen liegt das daran, dass die vierdimensionalen Quaternionen Drehungen im dreidimensionalen Raum beschreiben. Drei der Zahlen sind für Rotationen entlang der drei Drehachsen verantwortlich, während die vierte das Objekt staucht oder streckt. Diese Operationen sind aber nichtkommutativ: Wenn man ein Objekt um mehrere Achsen dreht, ist die Reihenfolge der Drehungen entscheidend.

Geht man einen Schritt weiter und paart die Quaternionen zu Oktonionen, dann stellt man fest, dass sie nichtassoziativ sind. Das heißt $(a \cdot b) \cdot c$ ist nicht gleich $a \cdot (b \cdot c)$. »Nichtkommutative Situationen kann man sich sehr einfach vorstellen«, erklärt der mathematische Physiker John Baez von der University of California in Riverside, ein führender Experte für Oktonionen. »Es macht einen Unterschied, ob man zuerst die Socken und dann die Schuhe anzieht oder umgekehrt. Nichtassoziativität ist dagegen schwieriger.« Auch wenn man die leeren Socken zuerst in die Schuhe legt, sollte man zumindest theoretisch immer noch in der Lage sein, seine Füße in beide zu stecken. »Der Unterschied erscheint unwirklich.«

In einem Aufsatz fasst Baez die eigentümlichen Eigenschaften der Divisionsalgebren anschaulich zusammen: »Die reellen Zahlen sind die Brotverdiener der Familie. Sie bilden einen komplett geordneten Körper, auf den man sich verlassen kann. Die komplexen Zahlen ähneln dem ein wenig auffälligen, aber immer noch respektablen jungen Bruder: nicht geordnet, jedoch algebraisch vollständig. Die nichtkommutativen Quaternionen sind wie der exzentrische Cousin, den man auf Familienfeiern meidet. Die Oktonionen entsprechen dagegen dem verrückten alten Onkel, den niemand aus dem Keller lässt: Sie sind nichtassoziativ.«

Symmetrien, die tief in der Natur verwurzelt sind

Diese ungewöhnliche Eigenschaft ist einer der Gründe, weshalb Physiker mit Oktonionen bisher nicht viel anfangen konnten. Allerdings ist sie auch eine ihrer Hauptattraktionen, erklärt Baez. Nicht zuletzt ist die Natur mit den vier fundamentalen Kräften, die auf ein paar Dutzend Teilchen und Antiteilchen wirken, ebenfalls seltsam.

Das Standardmodell beschreibt Elementarteilchen wie Elektronen und Quarks durch drei Symmetriegruppen (siehe »Symmetrien des Standardmodells«, S. 72): Sie diktieren, wie man bestimmte Teilchen gegeneinander austauschen kann, ohne dass sich die zu Grunde liegenden physikalischen Gleichungen dabei ändern. Das ist, als würde man alle Ecken eines Quadrats um 90 Grad drehen; am Ende sieht das Quadrat wieder so aus wie vorher. Jede der drei Symmetriegruppen entspricht einer fundamentalen Kraft des Standardmodells.

Ersetzt man beispielsweise alle negativ geladenen Elektronen durch ihr positiv geladenes Antiteilchen, das Positron, und umgekehrt, bleiben die Vorhersagen des Standardmodells gleich. Die Transformation gehört zu der »U(1)«, die den Elektromagnetismus beschreibt. Die zweite Symmetriegruppe des Standardmodells, die so genannte SU(2), repräsentiert die schwache Wechselwirkung, die für den radioaktiven Zerfall von Atomkernen verantwortlich ist. Die starke Kernkraft, die Quarks innerhalb der Nukleonen zusammenhält, wird durch die »SU(3)« dargestellt. Verbindet man alle drei Gruppen, erhält man die Symmetrie des Standardmodells: $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.

Die Theorie subatomarer Teilchen (siehe »Standardmodell der Teilchenphysik«, links) ist auf rätselhafte Weise strukturiert: Die sechs Leptonen, zu denen beispielsweise Elektronen und Neutrinos gehören, und die sechs Quarks lassen sich in drei fast identische Familien unterteilen. Sie unterscheiden sich lediglich durch die Massen der Teilchen, sonst teilen sie alle übrigen Eigenschaften, etwa ihre elektrische Ladung.

Quarks können jeweils in drei verschiedenen Formen vorkommen, die man als »Farbladungen« (Rot, Grün und Blau) bezeichnet. Die Träger der starken Kraft, Gluonen, koppeln an Farbladungen, so wie Photonen die elektromagnetische Kraft geladener Teilchen vermitteln.

Zu jeder fundamentalen Kraft gehört eine Ladung, die bestimmt, wie stark die Teilchen über diese Kraft wechselwirken. Insofern gibt es neben der elektrischen und der Farbladung auch noch eine »schwache Hyperladung«, die zu der schwachen Kernkraft gehört. All das trägt zur Symmetrie des Standardmodells bei.

Weshalb scheint die Natur der $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$-Gruppe zu folgen? Und warum haben die Elementarteilchen genau diese willkürlich anmutenden Eigenschaften? Die meisten Physiker hoffen, dass eine fundamentalere Theorie solche Fragen beantwortet. Das Standardmodell würde dann einer übergeordneten Struktur entspringen, so wie die newtonsche Physik aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt. Doch einige Querdenker verfolgen einen anderen Ansatz: Sie versuchen das Standardmodell durch Divisionsalgebren zu beschreiben und daraus »die verrückten Gesetzmäßigkeiten irgendwie herzuleiten«, erklärt Baez.

Dass Quaternionen diktieren, wie sich die Elementarteilchen des Standardmodells in der vierdimensionalen Raumzeit bewegen, lernte Furey während ihrer Promotion an der University of Waterloo. Da begann sie erstmals darüber nachzudenken, dass Oktonionen dabei helfen könnten, das gesamte Standardmodell zu erklären. »Ich erkannte, dass die acht Freiheitsgrade der Oktonionen einer Teilchenfamilie entsprechen könnten: einem Neutrino, einem Elektron, drei Up-Quarks und drei Down-Quarks (jeweils mit roter, grüner und blauer Farbladung)«, beschreibt sie. Solche Zahlenmystik beäugten Wissenschaftler anfangs eher skeptisch. Die scheinbar zufälligen Übereinstimmungen haben sich allerdings inzwischen gemehrt. »Wenn das Forschungsprojekt ein Krimi wäre«, meint sie, »würde ich sagen, dass wir immer noch dabei sind, Spuren zu sichern.«

Furey beschränkt sich aber nicht nur auf Oktonionen, sondern sie verbindet alle vier Divisionsalgebren: $\mathbb{R} \otimes \mathbb{C} \otimes \mathbb{H} \otimes \mathbb{O}$ ($\mathbb{R}$ steht für reelle Zahlen, $\mathbb{C}$ für komplexe Zahlen, $\mathbb{H}$ für Quaternionen und $\mathbb{O}$ für Oktonionen). Das Produkt heißt »Dixon-Algebra«, benannt nach dem US-amerikanischen Physiker Geoffrey Dixon. Er verfolgte bereits in den 1970er und 1980er Jahren den Ansatz, das Standardmodell mit dieser Algebra zu beschreiben, doch dann erhielt er eine Festanstellung und verließ das For-

schungsgebiet. In seinen Memoiren schreibt er: »Der Gedanke, dass die Algebra der Schlüssel zur Teilchenphysik ist, wurde zu einer Obsession – ich war bereit, für diese Idee von einer Klippe zu springen. Einige könnten sagen, dass ich es beinahe getan habe.«

Während Dixon und andere Forscher die Divisionsalgebren mit weiteren mathematischen Werkzeugen anreicherten, begnügt sich Furey mit der Dixon-Algebra. Als Kombination der vier Zahlensysteme bildet sie einen (1 · 2 · 4 · 8 =) 64-dimensionalen abstrakten Raum. In Fureys Modell sind die Elementarteilchen so genannte Ideale: Sie bevölkern nur einen kleinen Teil der Dixon-Algebra, einen »Unterraum«, und verlassen ihn niemals, selbst wenn man sie mit anderen Elementen multipliziert. Ein Beispiel für ein Ideal der ganzen Zahlen sind die geraden Zahlen: Multipliziert man eine gerade Zahl mit jeder beliebigen ganzen Zahl, ist das Ergebnis wieder gerade. Das heißt, ein Teilchen in Fureys Modell bleibt immer ein Teilchen, auch wenn es sich bewegt oder mit anderen Partikeln wechselwirkt.

Die seltsamen Eigenschaften der Oktonionen

Zunächst betrachtete die Kanadierin aber zwei separate Teile der Dixon-Algebra: $\mathbb{R} \otimes \mathbb{C} \otimes \mathbb{H}$ und $\mathbb{R} \otimes \mathbb{C} \otimes \mathbb{O}$. Verbindet man diese Algebren, ergibt sich daraus wieder die gesamte Dixon-Algebra. Der Trick dient dazu, die äußeren und inneren Symmetrien des Standardmodells zu trennen: Der quaternionische Teil, $\mathbb{R} \otimes \mathbb{C} \otimes \mathbb{H}$, beschreibt die Bewegungen der Elementarteilchen in der vierdimensionalen Raumzeit, die den Gesetzen der speziellen Relativitätstheorie folgen. Im zweiten Teil, $\mathbb{R} \otimes \mathbb{C} \otimes \mathbb{O}$, sollen die intrinsischen Teilcheneigenschaften entstehen, wie die unterschiedlichen Ladungen. Aus dem oktonionischen Anteil könnte die Symmetriegruppe SU(3) × SU(2) × U(1) folgen, der das Standardmodell unterliegt.

Einen ähnlichen Verdacht hegten Günaydin und Gürsey bereits vor mehreren Jahrzehnten. Sie fanden in den Strukturen von Oktonionen die SU(3) wieder, welche die starke Kernkraft beschreibt. Insgesamt sind die achtdimensionalen Zahlen aber symmetrischer, die SU(3)-Gruppe macht nur einen Teil davon aus.

Doch wie analysiert man die Symmetrie von Oktonionen? Dazu betrachten Mathematiker einen »Basissatz«: acht unabhängige Zahlen der Länge eins, die den gesamten Zahlenraum aufspannen. Für die komplexen Zahlen wären beispielsweise 1 und i ein passender Basissatz. Wenn man die verschiedenen oktonionischen Elemente (1, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6 und e_7) addiert, subtrahiert, multipliziert und dividiert, zeigen sich wiederkehrende Symmetrien. Die Muster im Zahlensystem folgen der äußerst ungewöhnlichen Symmetriegruppe »G_2«: Während sich andere Gruppen dieser Art in vier Kategorien einordnen lassen, bildet die G_2 eine Ausnahme. Sie ist eine von fünf »exzeptionellen« Gruppen – ein klarer Außenseiter (siehe **Spektrum** Mai 2018, S. 70).

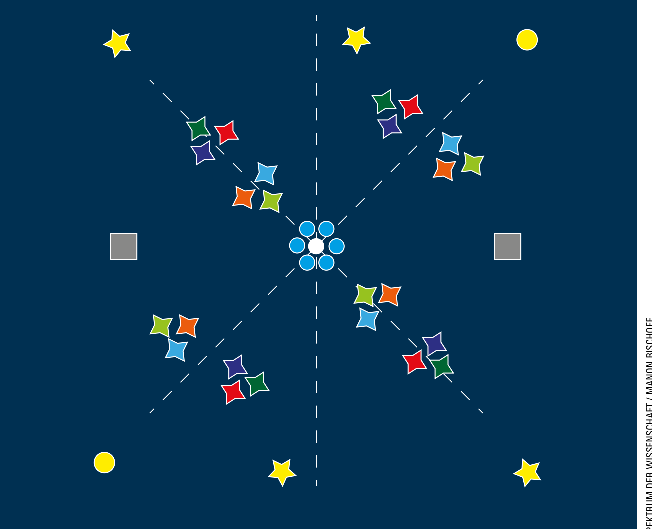
Dass Oktonionen nicht nur nichtassoziativ sind, sondern auch mit einer exzeptionellen Gruppe zusammenhängen, mehrte das wissenschaftliche Interesse an ihnen. Beispielsweise war der 2019 verstorbene Fields-Medaillen-Gewinner und Abel-Preisträger Michael Atiyah davon überzeugt, dass das endgültige Modell der Natur oktonionisch ist. »In der eigentlichen Theorie, die wir suchen«, sagte er 2010, »sollte die Schwerkraft als Folge der Oktonionen und der exzeptionellen Gruppen entstehen.« Er fügte hinzu: »Der Weg dahin wird schwer sein, weil wir wissen, dass Oktonionen sehr kompliziert sind. Aber wenn man sie gefunden hat, sollte sich daraus eine schöne und einzigartige Theorie ergeben.«

Günaydin und Gürsey interessierten sich allerdings nicht für die volle Symmetrie der Oktonionen. Sie suchten stattdessen nach Mustern der starken Kernkraft – und wurden fündig, als sie eines der Elemente aus dem Basissatz festhielten: Betrachtet man nur 1, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5 und e_6, dann ist die Struktur weniger symmetrisch, und von der ursprünglichen G_2 bleibt nur die kleinere SU(3) übrig. Günaydin und Gürsey nutzten diese Tatsache, um ein oktonionisches Modell der starken Kernkraft zu entwickeln.

Furey ging einen Schritt weiter. Im Mai 2018 veröffentlichte sie eine Arbeit, in der sie mehrere Ergebnisse miteinander verband, um alle Symmetrien des Standardmodells für eine Teilchenfamilie zu konstruieren. Aus ihrem Modell folgen die korrekten Teilcheneigenschaften eines Elektrons, eines Neutrinos, dreier Up-Quarks, dreier Down-Quarks und ihrer Antiteilchen. Außerdem folgt aus den Gleichungen, dass die elektrische Ladung nur als ganzzahliges

Symmetrien des Standardmodells

Ordnet man die Teilchen (hier als bunte Symbole dargestellt) des Standardmodells nach ihren Eigenschaften (etwa nach ihrer elektrischen Ladung oder schwachen Hyperladung) und projiziert das Bild auf eine zweidimensionale Ebene, ergibt sich das unten dargestellte symmetrische Muster. Dessen Symmetrien spiegeln die Gruppen des Standardmodells wider: SU(3) × SU(2) × U(1). Das Higgs-Teilchen (graue Quadrate) macht das gesamte Modell weniger symmetrisch, es bricht den SU(2) × U(1)-Teil auf eine einfache U(1) herunter.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANON BISCHOFF

Vielfaches der Elektronenladung auftreten kann – eine Tatsache, die Physiker schon seit mehr als 100 Jahren beschäftigt.

Doch es ist zu früh zum Jubeln. Weder Furey noch andere Wissenschaftler wissen, wie man dieses Modell auf alle drei Teilchenfamilien erweitern kann. Die Kanadierin versucht momentan einen anderen Weg zu gehen: Indem sie nur den oktonionischen Teil $\mathbb{R} \otimes \mathbb{C} \otimes \mathbb{O}$ der Dixon-Algebra berücksichtigt, kann sie zumindest zwei Gruppen – die SU(3) und die U(1) – des Standardmodells für alle drei Teilchenfamilien konstruieren. Sie entsprechen den beiden Symmetrien, die in der Natur ungebrochen auftreten; der die Masse vermittelnde Higgs-Mechanismus bricht nämlich die SU(2). Damit die Elementarteilchen eine Masse erhalten, muss das Standardmodell einen Preis zahlen: Es wird weniger symmetrisch.

Furey machte mit ihrem vereinfachten Modell eine überraschende Entdeckung: Sie fand heraus, dass auch die hypothetischen »sterilen Neutrinos« einen Platz darin finden. Ein solches Teilchen würde nur über die Schwerkraft mit anderen Partikeln wechselwirken – es hätte also keinerlei Ladung und würde nicht über die schwache Wechselwirkung zerfallen oder durch sie entstehen. Sterile Neutrinos sind wegen dieser ungewöhnlichen Eigenschaften viel versprechende Kandidaten für die schon lange gesuchte Dunkle Materie.

Mit der Dixon-Algebra zur Stringtheorie

Um physikalische Prozesse aber korrekt zu beschreiben, ist die vollständige SU(3) × SU(2) × U(1)-symmetrische Theorie nötig. »Das Modell für drei Familien besitzt eine kleinere Symmetrie und ist damit rudimentärer«, erklärte mir Furey. »Die Frage ist, ob es einen Weg vom Einfamilienbild zum Dreifamilienbild gibt. Ich glaube schon.«

Dieser Frage jagt sie nun hinterher. Und damit ist sie nicht allein. Die mathematischen Physiker Michel Dubois-Violette, Ivan Todorov und Svetla Drenska verfolgen das gleiche Ziel: Sie versuchen die Symmetrien der drei Teilchenfamilien durch Oktonionen auszudrücken. Nach Jahren einsamen Rechnens hat Furey endlich Mitstreiter gefunden, die allerdings unterschiedliche Ansätze verfolgen. Ihre drei Kollegen verbinden die Divisionsalgebren mit anderen mathematischen Strukturen, während sich Furey weiterhin bloß an die Dixon-Algebra hält. Das sei schon kompliziert genug, erklärt sie. Außerdem könne man die Algebra in enorm viele Teile zerlegen. Fureys Ziel ist es, aus einem der Teile ein Modell zu konstruieren, das die Masse der Elementarteilchen, den Higgs-Mechanismus, die Schwerkraft sowie die Raumzeit korrekt voraussagt.

Tatsächlich scheint das Konzept der Raumzeit tief in der Dixon-Algebra verankert zu sein. Als Wissenschaftler verschiedene Elemente aus $\mathbb{R} \otimes \mathbb{C} \otimes \mathbb{H} \otimes \mathbb{O}$ miteinander multiplizierten, fiel ihnen auf, dass jede dabei entstehende mögliche Verkettung durch nur zehn Matrizen beschrieben wird. Diese Matrizen entsprechen außerdem den Symmetrien einer zehndimensionalen Raumzeit. Die Stringtheorie, welche die vier fundamentalen Kräfte zu vereinen versucht, sagt ebenfalls eine Raumzeit mit zehn Dimensionen voraus. Überraschenderweise tauchen auch in der Stringtheorie Oktonionen auf. Inwiefern Fureys Arbeit mit diesen Ergebnissen zusammenhängt, ist noch ungewiss.

Genau wie Fureys Zukunft. Aktuell ist sie auf der Suche nach einer freien Stelle. Falls sie keine finden sollte, bleiben ihr immer noch die Skipisten und das Akkordeon. »Akkordeons sind die Oktonionen der Musikwelt«, meint sie – »tragisch missverstanden.« Sie fügt hinzu: »Aber selbst wenn ich diesen Lebensweg einschlage, würde ich meine Forschung niemals aufgeben.«

Zu meinen philosophischen Fragen – beispielsweise über die tiefere Verbindung von Mathematik und Physik – wollte sich Furey nicht äußern. Allerdings beschäftigt sie die Frage, warum die Division eine so wichtige Rolle in der Natur zu spielen scheint. Sie hat das Gefühl, dass die Dixon-Algebra nur eine Näherung ist. Ihrer Meinung nach wird ein mathematisches System, das nicht das unendliche Kontinuum reeller Zahlen enthält, die Theorie aller Naturgesetze endgültig ersetzen. Eine ähnliche Einstellung teilen viele Physiker; sie gehen davon aus, dass in der Natur nichts Kontinuierliches und nichts Unendliches auftaucht. Doch das sind nur Mutmaßungen.

Nachdem das Standardmodell allen Tests in erstaunlicher Präzision standgehalten hat und noch immer keine neuen Teilchen am LHC aufgetaucht sind, wäre es möglicherweise an der Zeit, wieder zu Stift und Papier zu greifen. »Vielleicht haben wir bisher nicht alle Teile passend zusammengefügt«, überlegt Latham Boyle vom Perimeter Institute. Diese Möglichkeit sei »viel versprechender, als viele Menschen glauben, und sie verdient mehr Aufmerksamkeit, als sie derzeit bekommt. Deshalb bin ich sehr froh, dass einige Leute wie Cohl sie ernsthaft verfolgen.«

Boyle selbst forscht nicht an Oktonionen. Aber wie viele andere gibt er zu, ihren Sirenengesang zu hören. »Ich teile die Hoffnung«, sagt er, »und sogar die Vermutung, dass Oktonionen irgendwie eine Rolle in der fundamentalen Physik spielen. Sie sind einfach sehr schön.« ◂

QUELLEN

Baez, J.C.: The octonions. Bulletin of the American Mathematical Society 39, 2002

Furey, C.: SU(3) × SU(2) × U(1) (× U(1)) as a symmetry of division algebraic ladder operators. European Physical Journal C 78, 2018

Furey, C.: Charge quantization from a number operator. Physics Letters B 742, 2015

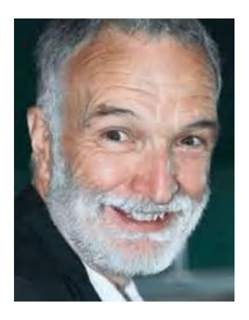
WEBTIPP

In der englischsprachigen Videoserie erklärt Cohl Furey, wie physikalische Modelle mit den Divisionsalgebren zusammenhängen: www.spektrum.de/video/divisionsalgebren-in-der-physik/1614224

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »The peculiar math that could underlie the laws of nature« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



SCHLICHTING!
SCHWIMMEN IN DER LUFT



Die Samen des Löwenzahns hängen nicht an flächigen Flügeln, sondern bloß an einem filigranen Faserskelett. Doch gerade das lässt sie langsam und stabil durch die Luft gleiten.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

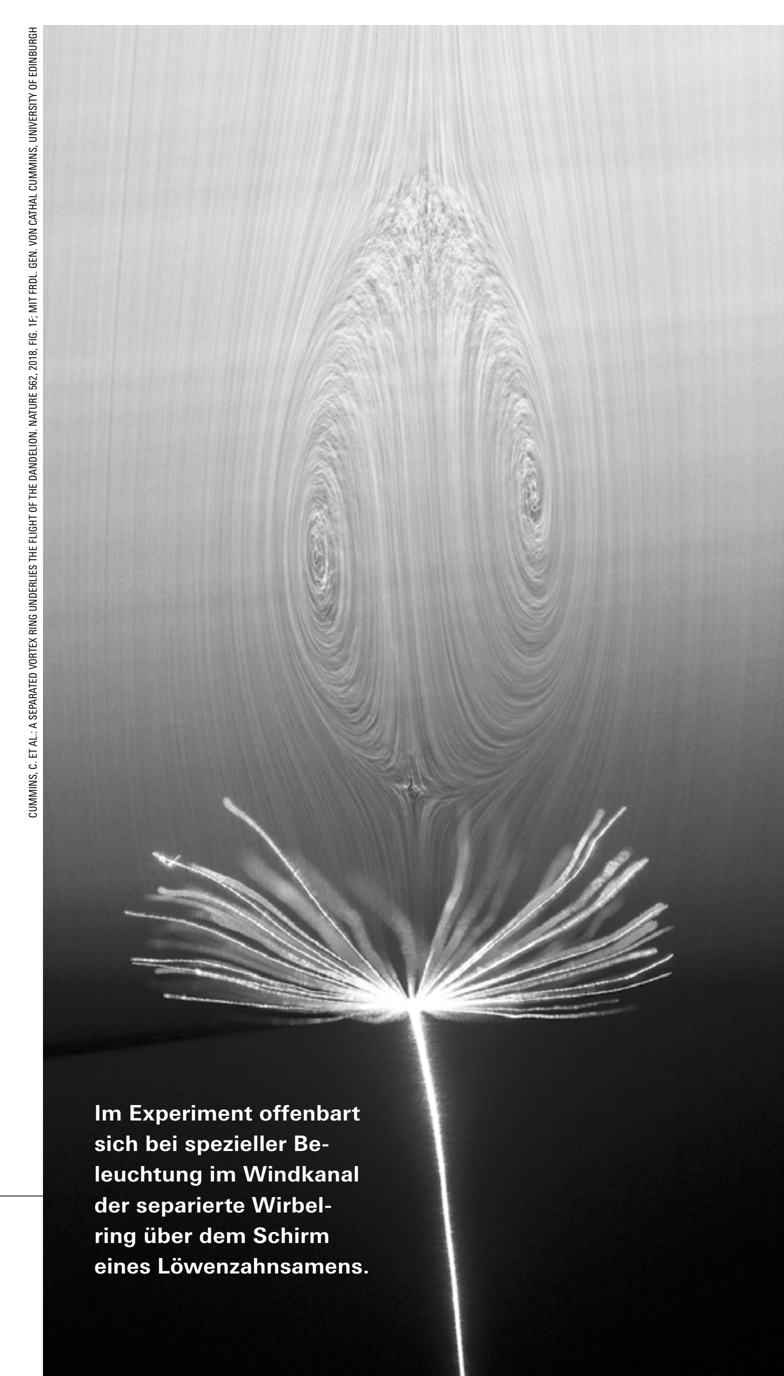
⏩ spektrum.de/artikel/1626472

Eine Welt in einem Sandkorn zu sehn
und einen Himmel in einer wilden Blume
William Blake (1757–1827)

Die Löwenzahnpflanze erobert jedes Jahr neben Feldern und Wiesen selbst kleinste Lücken im Beton unserer Städte. Ihre Hartnäckigkeit verdankt sie einer langen Wurzel, die sie fest im Boden verankert, ihre erfolgreiche Verbreitung aber vor allem den leichten Samen. Diese lassen sich mit Hilfe luftiger Fallschirme in weit entfernte Gegenden tragen, um auch dort Fuß zu fassen. Ähnlich wie Seifenblasen scheinen sie sich der Schwerkraft regelrecht zu widersetzen – das macht Pusteblumen als Spielzeug beliebt.

Aus der Nähe betrachtet besteht ein einzelner Schirm, in der Fachsprache Pappus genannt, aus einem winzigen Stängel. An einem Ende hängt ein längliches Samenkörnchen, und auf der anderen Seite geht er in einen strahlenförmigen Kranz von Miniaturstreben über. Diese sind nach außen gerichtet und besitzen feinste Verästelungen, die mit bloßem Auge nur schwer zu erkennen sind.

Das Ganze erinnert an einen vom Wind umgestülpten Regenschirm. Doch trotz der frappierenden Ähnlichkeit bieten die Filamente des Pappus wenig Angriffsfläche, denn der Schirm ist kaum bespannt: Blickt man senkrecht hindurch und misst an dieser Projektion genau nach, sind nicht einmal zehn Prozent der Fläche bedeckt – der Rest ist durchlässig. Wenn so viel Luft durch die Zwischenräume strömen kann, sollte das Geäst im Vergleich zu einer geschlossenen Scheibe eine geringe Bremskraft entfalten. Aber unsere Intuition ist an Phänomenen alltäglicher Dimensionen geschult und täuscht uns hier völlig. 2018 hat eine Gruppe Physiker von der University of Edinburgh gezeigt, dass der poröse Pappus des Löwenzahns im Gegenteil eine etwa viermal so



CUMMINS, C. ET AL.: A SEPARATED VORTEX RING UNDERLIES THE FLIGHT OF THE DANDELION. NATURE 562, 2018, FIG. 1F; MIT FRDL. GEN. VON CATHAL CUMMINS, UNIVERSITY OF EDINBURGH

Im Experiment offenbart sich bei spezieller Beleuchtung im Windkanal der separierte Wirbelring über dem Schirm eines Löwenzahnsamens.



H. JOACHIM SCHLICHTING

Die reife Löwenzahnpflanze lädt als Pusteblume zum Verbreiten der kugelförmig angeordneten, gefiederten Samen ein.

große Bremswirkung ausübt wie eine luftdichte Fläche vom gleichen Radius.

Wir irren uns, weil wir physikalische Einflüsse auf das Verhalten von Systemen tendenziell unabhängig von deren Größenordnung betrachten. Beispielsweise erstaunen uns die Kräfte winziger Tiere wie der Ameisen, die mit dünnen Beinchen das 50-Fache ihres Körpergewichts tragen. Darin kommt jedoch keine biologische Besonderheit zum Ausdruck. Vielmehr nimmt auf dem Weg in den Mikrokosmos der Beitrag der Schwerkraft schneller ab als der Einfluss anderer Kräfte. Denn Erstere hängt von der Masse ab, die grob betrachtet wie das Volumen sinkt, also mit der dritten Potenz des Radius. Andere Kräfte, beim Beispiel der Ameise die Muskelkraft, hängen von der Querschnittsfläche ab, die sich nur mit dem Quadrat des Radius verringert.

Stabile Umtriebe in zäher Luft

Das zeigt sich insbesondere bei der Sinkgeschwindigkeit in der Luft. Sobald sich ein konstanter Wert eingestellt hat, halten sich die zur Masse proportionale Schwerkraft und die zur Querschnittsfläche proportionale Luftwiderstandskraft die Waage. Das geschieht bei kleineren Objekten früher. Deswegen schwebt Wasser in Form feiner Nebeltröpfchen lange umher (siehe »Winzige Tröpfchen ganz groß«, **Spektrum** Juli 2018, S. 64).

Die Flächen-Volumen-Relation macht sich bei derart winzigen Strukturen wie den Filamenten des Pappus noch in anderer Hinsicht bemerkbar. Luft besitzt wie alle Flüssigkeiten und Gase eine Zähigkeit (Viskosität). Bei größeren und schwereren Objekten tritt diese wegen der dominierenden Trägheit kaum in Erscheinung. Der filigrane Federkelch des Löwenzahns aber bekommt die Viskosität der Luft deutlich zu spüren. Die Strömungsvorgänge beim Sinken des Pappus lassen sich daher nicht mehr rein aerodynamisch beschreiben. Die Luft wirkt wie eine viskose Flüssigkeit. Beim Durchgang durch den Schirm bewegen sich benachbarte Luftpakete nicht unabhängig voneinander, sondern vielmehr kommt es zu beachtlichen Wechselwirkungen, und der Pappus verhält sich eher wie eine durchlässige Membran.

Das ist für das ruhige, ungestörte Sinken von grundlegender Bedeutung. Während nämlich eine frei fallende Scheibe eine oszillierende Wirbelschleppe nach sich zieht und daher pendelnd zu Boden geht (siehe »Wie Laub sich abwärtswiegt«, **Spektrum** Oktober 2018, S. 68), unterbindet die hohe Porosität des Schirms diesen Vorgang.

Die Experimente der britischen Forschergruppe zeigen aber auch: Eine solche Stabilität tritt nicht bei einem Schirm jedweder Porosität auf. Vielmehr ist die Größe und Struktur der Zwischenräume von entscheidender Bedeutung. Sie ist gewissermaßen das Ergebnis einer subtilen evolutionären Abstimmung.

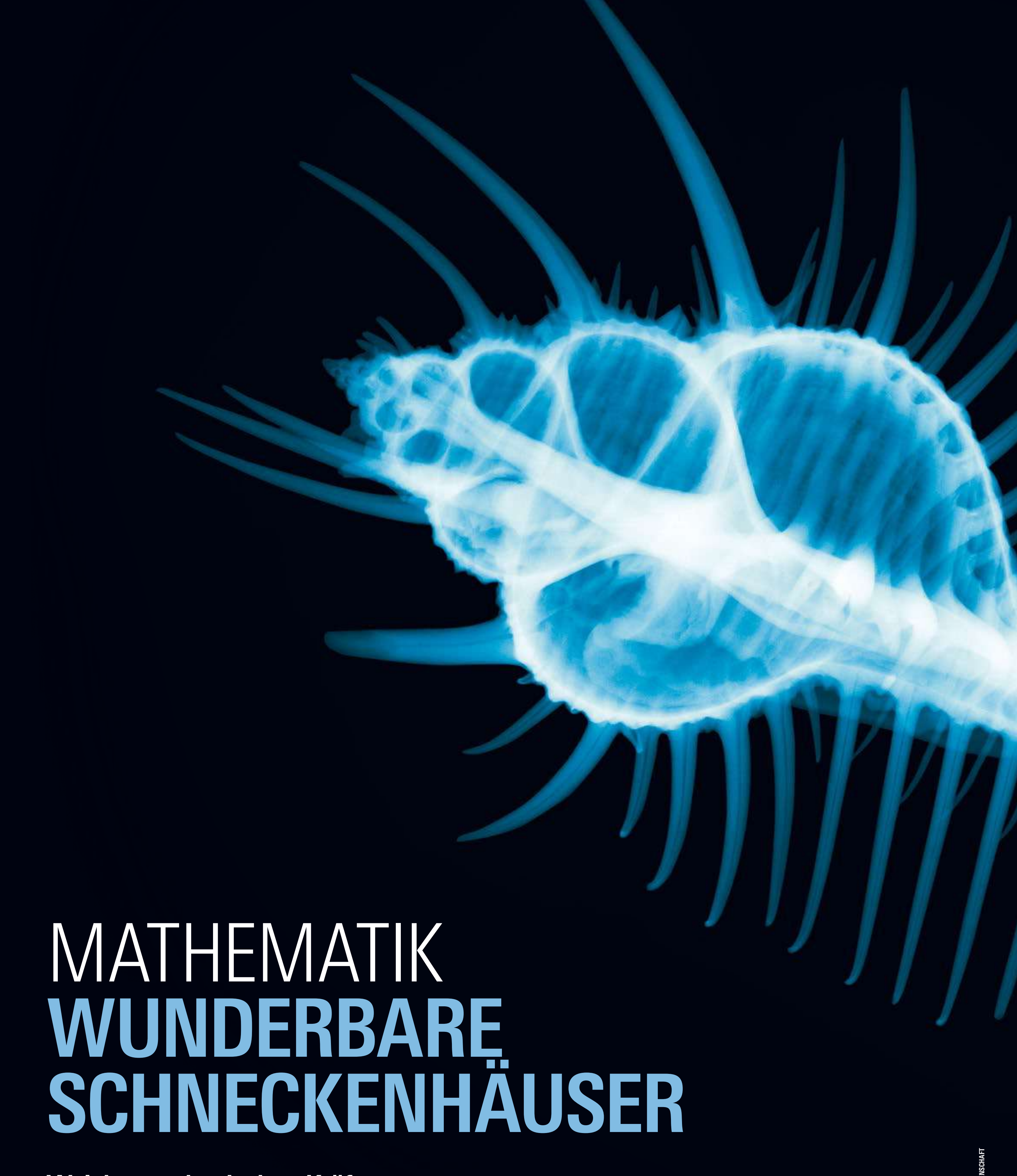
Die Lücken zwischen den Filamenten lassen nämlich gerade so viel Luft hindurch, dass genau über dem Pappus ein länglicher Wirbel entsteht und aufrechterhalten wird (siehe Bild linke Seite). Diese Krönung des Sinkflugs nennen die Wissenschaftler einen separierten Wirbelring (separated vortex ring, SVR), weil er von der übrigen Luftströmung in der Umgebung des Pappus getrennt auftritt. Er bleibt stabil, da die hindurchdurchfließende Luft kontinuierlich auf die äußere Schicht des Wirbelrings auftrifft, ihn umrundet und durch Reibung antreibt. Schnell bewegte Luft erzeugt einen niedrigeren Druck. Darum wirkt der Wirbelring wie ein kleines Tiefdruckgebiet, das den Pappus anzieht. So leistet es einen Beitrag dazu, ihn noch länger in der Luft zu halten, als er es allein auf Grund seiner Winzigkeit könnte. Mit diesem Trick tragen Luftströmungen die Samen weit von ihrem Ursprungsort fort.

Der separierte Wirbelring ist ein bislang unbekanntes Strömungsphänomen. Dabei dürfte ihm über die Pusteblume hinaus Bedeutung zufallen: Er kann theoretisch Flugbewegungen diverser biologischer und künstlicher Miniaturgebilde stabilisieren und so erhebliche Gewichtseinsparungen im Vergleich zu undurchlässigen Strukturen ermöglichen. Ähnliches Verhalten wie bei den Löwenzahnsamen ist auch von winzigen Insekten bekannt, die sich ebenfalls mit faserigen Büscheln statt mit soliden Flügeln fortbewegen. Da die Zähigkeit der Luft offenbar eine so große Rolle spielt, könnte man hier sogar eher von Schwimmen als von Fliegen sprechen. Schon bei etwas größeren Gebilden, wie etwa den Ahornsamen, sind hingegen durchgehende Flügel von Vorteil.

Bei wie vielen Auftriebsmechanismen kleiner Strukturen in der Natur sich der separierte Wirbelring tatsächlich merklich auswirkt, ist nun eine Aufgabe für weitere Untersuchungen. Ingenieure denken unterdessen bereits darüber nach, die Entdeckung technisch zu nutzen.

QUELLE

Cummins, C. et al.: A separated vortex ring underlies the flight of the dandelion. Nature 562, 2018

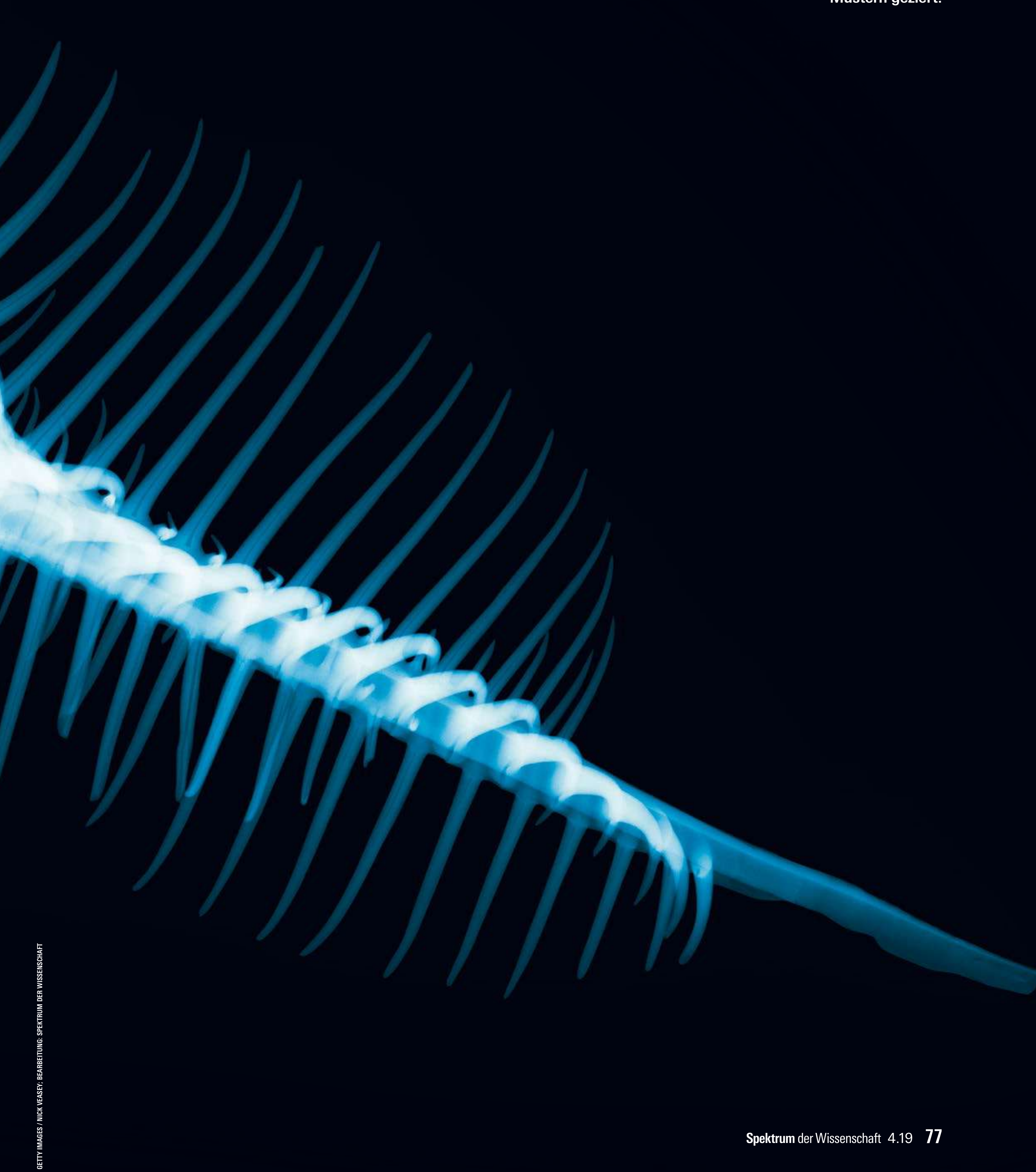


MATHEMATIK
WUNDERBARE SCHNECKENHÄUSER

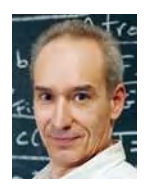
Welche mechanischen Kräfte formen die kunstvollen Behausungen von Muscheln und Schnecken?

GETTY IMAGES / NICK VEASEY; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Viele Schneckenhäuser und Muschelschalen werden von außergewöhnlichen Mustern geziert.



GETTY IMAGES / NICK VEASEY; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Derek E. Moulton (links) ist Professor für mathematische Biologie an der University of Oxford. **Alain Goriely** (Mitte) ist Professor für mathematische Modellierung an der University of Oxford. **Régis Chirat** forscht als Paläontologe an der Université de Lyon und ist auf fossile Weichtiere spezialisiert.

spektrum.de/artikel/1626474

Weichtiere sind fabelhafte Architekten. Sie bauen Häuser, die ihre sensiblen Körper vor Raubtieren und Umwelteinflüssen schützen. Ihre prachtvollen Schalen sind ungewöhnlich widerstandsfähig – und schön. Häufig weisen die Behausungen komplexe Formen auf, die in nahezu perfekter mathematischer Regelmäßigkeit erscheinen. Die Schalen von Perlbooten etwa zeigen ein logarithmisches Spiralmuster, das mit dem goldenen Schnitt zusammenhängt. Nun dürften diese evolutionär vergleichsweise einfachen Organismen sicherlich kein tieferes mathematisches Verständnis besitzen. Wie können sie dann aber so präzise und komplizierte Muster produzieren?

Vor über 100 Jahren haben Forscher erkannt, dass auch Zellen, Gewebe und Organe den gleichen physikalischen Kräften unterliegen wie die übrige Materie. Die meisten Biologen des 20. Jahrhunderts ignorierten jedoch diese Tatsache und untersuchten meist nur, inwiefern Gene und Proteine natürlich auftretende Muster erzeugen. Erst in den letzten Jahrzehnten haben sie begonnen, auch mathematische und physikalische Modelle in ihr Forschungsgebiet einzubeziehen. Auf diese Weise hat unsere interdisziplinäre Arbeit der letzten Jahre zu faszinierenden Erkenntnissen geführt und unter anderem erklärt, wie Muscheln und Schneckenhäuser ihre ästhetischen Strukturen erhalten.

AUF EINEN BLICK
WIE SCHALEN IN FORM KOMMEN

1. Muscheln und Schnecken bauen ihre beeindruckenden Schalen und Häuser mit nahezu perfekter mathematischer Präzision.

2. Unsere Modelle enthüllen, dass sie dazu nur wenigen Regeln folgen. Auffällige Ornamente wie Stacheln oder Rippen entstehen durch die beim Wachstum auftretenden mechanischen Kräfte.

3. Dies erklärt, warum so viele unterschiedliche Weichtierarten unabhängig voneinander ähnliche Schalenmuster entwickelt haben.

Um die komplizierten geometrischen Muster der Gehäuse besser zu verstehen, bedienten wir uns der Differenzialgeometrie, einer mathematischen Disziplin, die Kurven und Oberflächen untersucht. Dabei fanden wir heraus, dass sich die ausgeklügelten Formen aus wenigen einfachen Regeln ergeben, denen die Weichtiere beim Bau ihrer Häuser folgen. Zusammen mit den mechanischen Kräften, die während des Schalenwachstums erzeugt werden, entstehen so unzählige Mustervariationen. Unsere Ergebnisse erklären, wie sich auffällige Merkmale wie Stacheln oder Rippen in etlichen verschiedenen Weichtierarten unabhängig voneinander entwickeln konnten. Anders als Wissenschaftler bisher glaubten, müssen die Kreaturen nicht die gleichen genetischen Veränderungen durchlaufen, um ähnliche Verzierungen aufzuweisen – vielmehr sind es die physikalischen Gesetze, die ihre äußere Form am stärksten prägen.

Drei einfache Regeln für den Hausbau

Dem »Mantel« der Weichtiere fällt die verantwortungsvolle Aufgabe des Hausbaus zu. Das dünne, weiche Organ scheidet an der Öffnung der Schale Schicht für Schicht eine Substanz aus, die reich an Kalziumkarbonat ist. Damit die charakteristische Spiralform von Schnecken und ihren Verwandten entsteht, muss der Mantel nur drei einfache Grundregeln befolgen:

- Expansion: Der Mantel scheidet gleichmäßig zunehmend immer mehr Material aus, so dass die Öffnung der Schale wächst. Der ursprüngliche Kreis verwandelt sich damit in einen Kegel.
- Drehung: Indem etwas mehr Material auf einer Seite ausgeschieden wird, dreht sich die Schalenöffnung. Aus dem anfänglichen Kreis wird eine Donutform.
- Torsion: Das Weichtier dreht die Öffnung um ihren Mittelpunkt. Dadurch rotieren die Ablagerungspunkte, und die Schale windet sich.

Wenn der Mantel eines Tiers ausschließlich den ersten beiden Regeln folgt, entsteht eine ebene spiralförmige Schale wie die der Perlboote. Die Torsion führt dagegen zu einer konischen Spirale wie man sie beispielsweise bei Weinbergschnecken beobachtet.

Für einige Schalenbauer ist das das Ende der Geschichte – sie haben durch drei einfache Regeln ein stabiles und elegantes Zuhause erschaffen. Wir wollten aber verstehen, wie es manchen Tieren gelingt, ihre Schale mit außergewöhnlichen Stacheln und anderen auffälligen Verzierungen zu schmücken. Dazu untersuchten wir die Kräfte, die während des Schalenwachstums entstehen, und stießen dabei auf ein spannendes mechanisches System.

Während des Wachstums scheidet der Mantel ein flüssiges Material aus, das langsam verkalkt und zur Schale aushärtet. Zwischen dem Mantel und der Schale befindet sich daher eine noch flexible »generative Zone«. Falls die Schale nicht genauso schnell wächst wie das darin befindliche Weichtier, entstehen in diesem Bereich die einzigartigen Verzierungen.

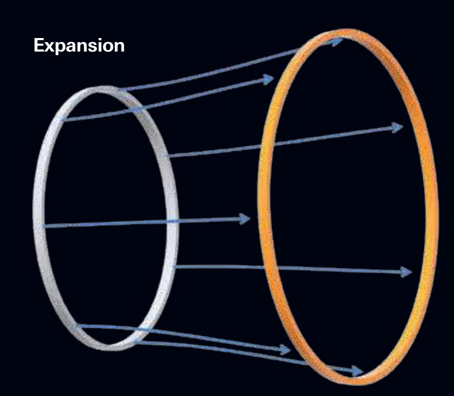
Jede Fehlanpassung zwischen dem Mantel und der bereits verkalkten Öffnung belastet das Mantelgewebe:

Spiralen

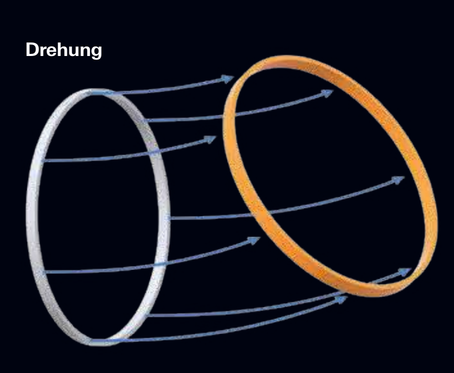
Weichtiere folgen nur wenigen einfachen Prinzipien, um spiralförmige Schalen herzustellen. Die erste Regel ist die Expansion: Das Weichtier scheidet an der Schalenöffnung gleichmäßig immer mehr Material ab, um die Öffnung zu vergrößern. Die zweite Regel ist die Rotation: Indem es etwas mehr Material auf einer Seite der Öffnung ablegt, bildet das Weichtier aus einem ursprünglichen Kreis eine Donutform. Die dritte Regel ist die Torsion: Das Weichtier dreht die Öffnung um ihren Mittelpunkt. Verschiedene Kombinationen dieser Regeln ergeben unterschiedliche Spiralformen.

Expansion und Drehung
Nautilus

Expansion

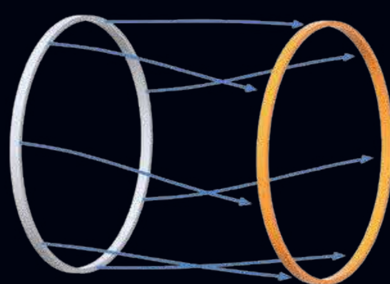


Drehung





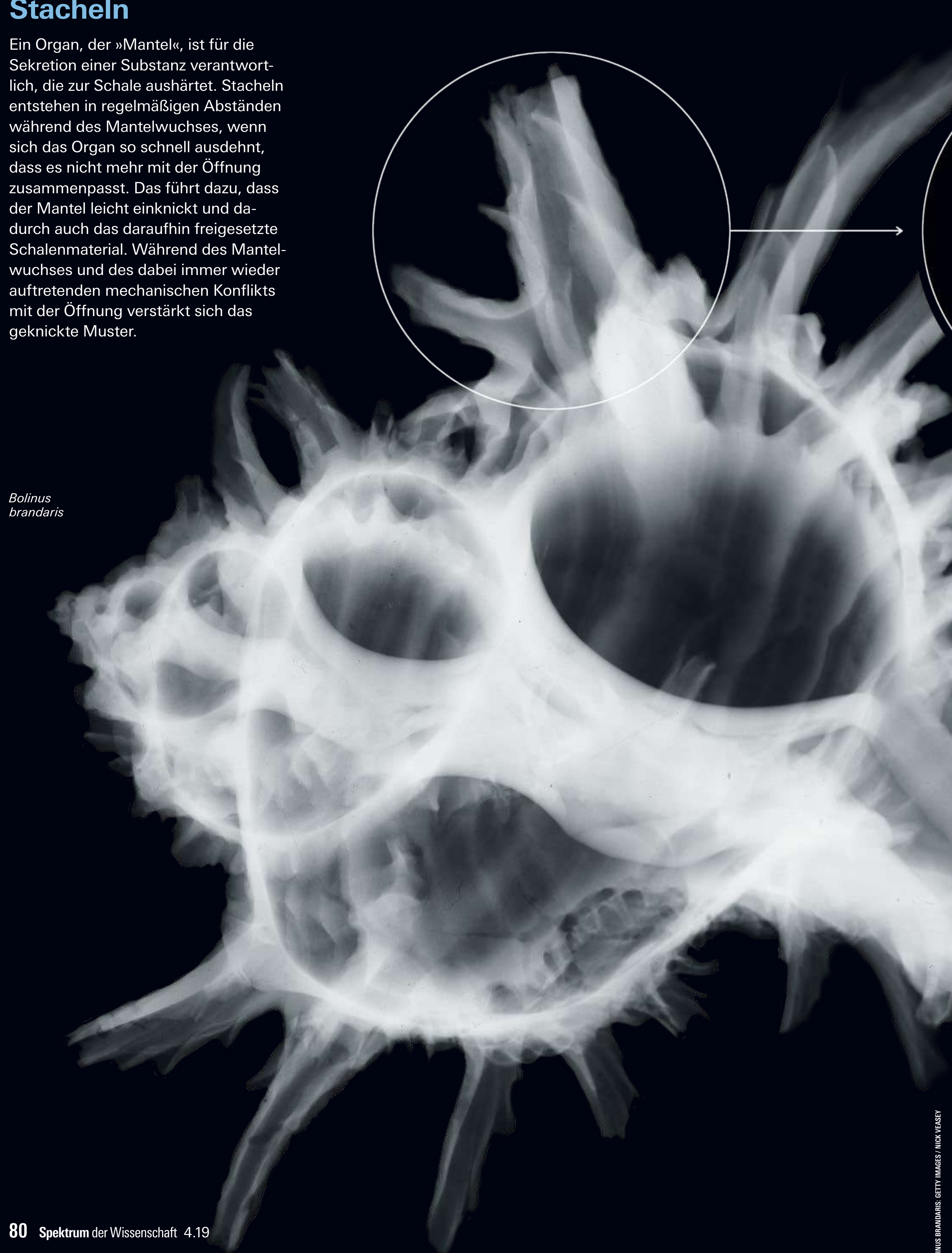
Torsion



Expansion, Drehung und Torsion
Turritella communis

Stacheln

Ein Organ, der »Mantel«, ist für die Sekretion einer Substanz verantwortlich, die zur Schale aushärtet. Stacheln entstehen in regelmäßigen Abständen während des Mantelwuchses, wenn sich das Organ so schnell ausdehnt, dass es nicht mehr mit der Öffnung zusammenpasst. Das führt dazu, dass der Mantel leicht einknickt und dadurch auch das daraufhin freigesetzte Schalenmaterial. Während des Mantelwuchses und des dabei immer wieder auftretenden mechanischen Konflikts mit der Öffnung verstärkt sich das geknickte Muster.

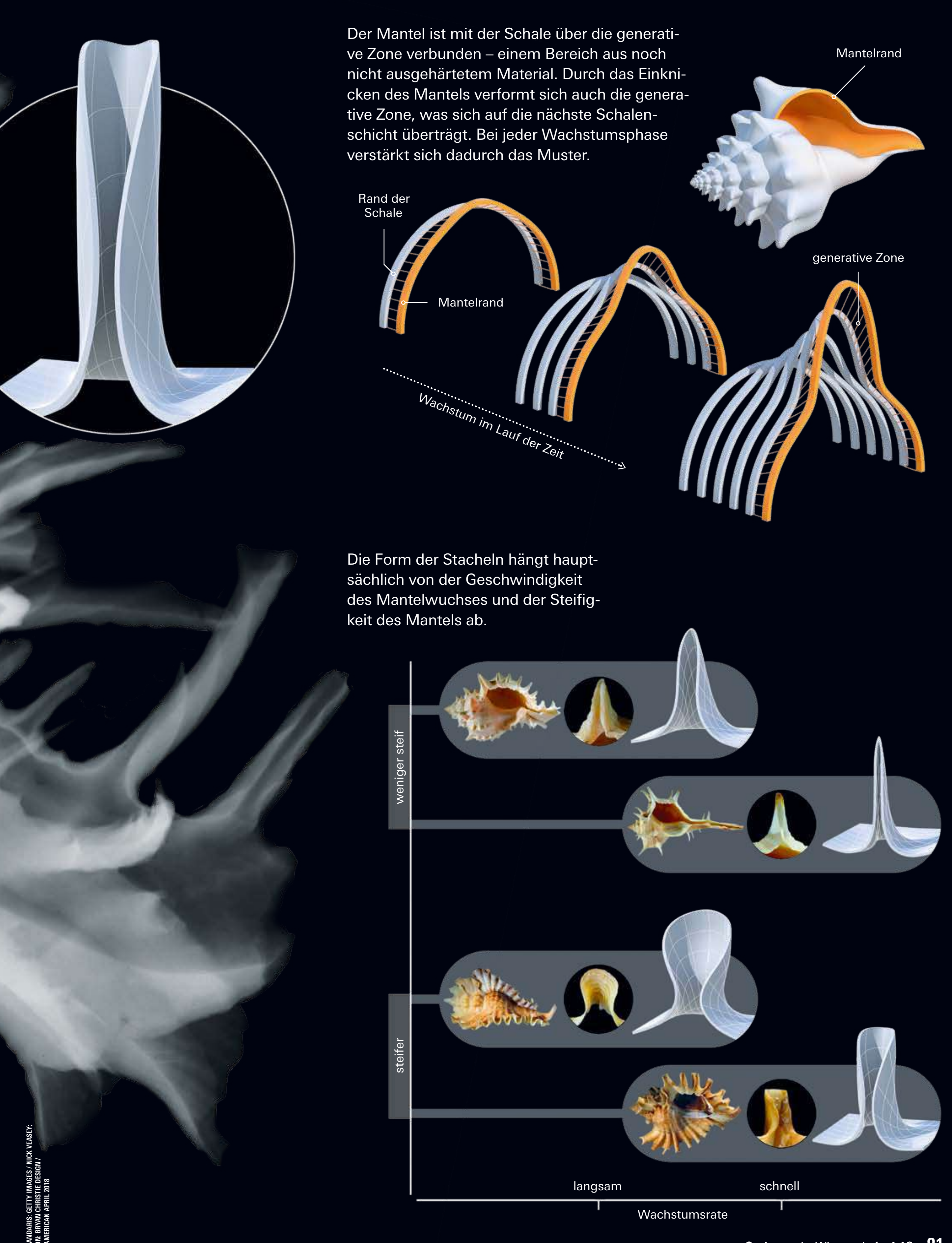


Bolinus brandaris

BOLINUS BRANDARIS: GETTY IMAGES / NICK VEASEY

Der Mantel ist mit der Schale über die generative Zone verbunden – einem Bereich aus noch nicht ausgehärtetem Material. Durch das Einknicken des Mantels verformt sich auch die generative Zone, was sich auf die nächste Schalenschicht überträgt. Bei jeder Wachstumsphase verstärkt sich dadurch das Muster.

Die Form der Stacheln hängt hauptsächlich von der Geschwindigkeit des Mantelwuchses und der Steifigkeit des Mantels ab.



BOLINUS BRANDARIS: GETTY IMAGES / NICK VEASEY; ILLUSTRATION: BRYAN CHRISTIE DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2018

Ist der Mantel zu klein, dann dehnt er sich aus, um sich der Schalenöffnung anzugleichen. Ist er hingegen zu groß, zieht er sich zusammen. Wenn sich die generative Zone durch solche Spannungen verformt, härtet das neu ausgeschiedene Material in dieser Form aus, was im nächsten Wachstumsschritt wiederum den Mantel beeinflusst.

Zu den auffälligsten Ornamenten gehören Stacheln, die meist senkrecht zur Schalenöffnung auftreten und mehrere Zentimeter aus der Oberfläche herausragen. Sie entstehen jedes Mal, wenn der Mantel einen Wachstumsschub erfährt. In diesen Phasen entwickelt sich der Mantel so schnell, dass er zu groß wird und nicht mehr zur vergleichsweise kleinen Schalenöffnung passt. Er knickt dann leicht ein, und das daraufhin ausgeschiedene Material behält die Kante bei, die während des Prozesses entsteht. Im nächsten Schritt hat sich der Mantel weiter vergrößert und ragt

Rippen

Schalen von Ammoniten, einer Gruppe ausgestorbener Weichtiere, weisen regelmäßige Rippen auf, die senkrecht zur Schalenöffnung aus der Oberfläche herausragen. Unser mathematisches Modell zeigt, dass sich diese Verzierung aus den entgegengesetzten Kräften des Mantels und der generativen Zone ergibt. Daraus entsteht ein oszillierendes System aus Spannung und Kompression. Dehnt sich die Öffnung des Weichtiers nur langsam aus, ergibt sich eine dichte Verrippung (links), während eine schnelle Expansion zu glatten Schalen führt (rechts).

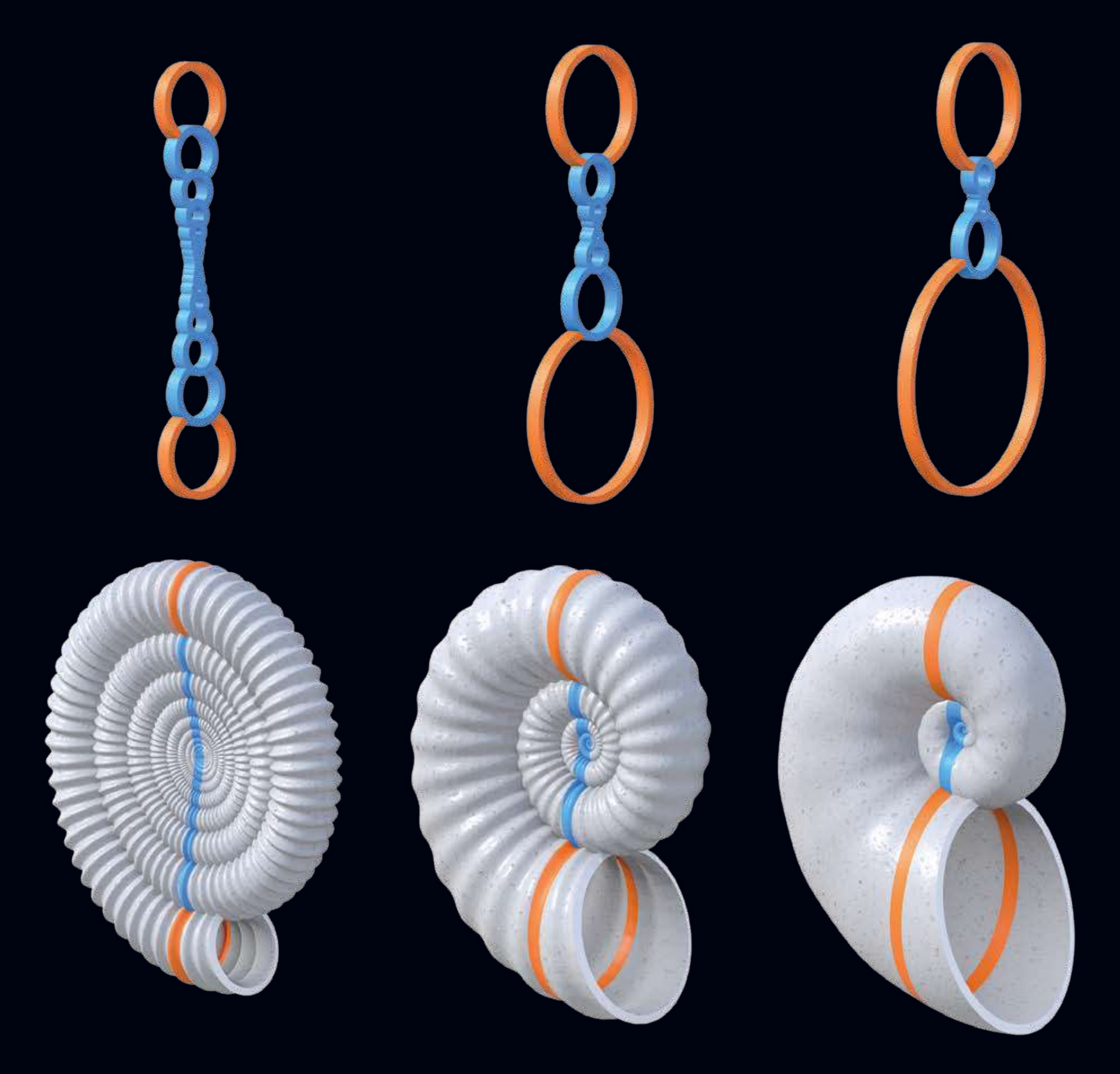


ILLUSTRATION: BRYAN CHRISTIE DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN APRIL 2018

erneut über die Öffnung hinaus, so dass sich der Knick verstärkt, was schließlich einen ausgeprägten Stachel bildet.

Dieser wiederholte Prozess führt unserer Ansicht nach zu den charakteristischen Stacheln vieler Weichtiere. Ihre genaue Anordnung sollte dabei hauptsächlich von der Steifigkeit des Mantels und der Wachstumsrate während eines Schubs abhängen.

Um unseren Verdacht zu überprüfen, entwarfen wir ein mathematisches Modell, in dem der Mantel mit einem dynamischen Unterbau verbunden ist, der Schritt für Schritt seine Form ändert. Während wir die typischen Wachstums- und Materialeigenschaften der Tiere variierten, ergaben unsere Simulationen eine Vielzahl von Stachelmustern, die den Formen realer Schalen ähneln und damit unsere Vermutung bestätigten.

Ein mechanischer Konflikt führt zu Rippen und zu Stacheln

Weichtiere schmücken ihre Schalen jedoch nicht nur mit Stacheln. Eine andere Verzierung findet sich bei den ausgestorbenen Ammoniten, die mit den heutigen Kopffüßern (etwa den Perlbooten und Tintenfischen) verwandt sind. Ammoniten beherrschten 335 Millionen Jahre lang die Ozeane, bevor sie vor etwa 65 Millionen Jahren verschwanden. Wegen der Fülle ihrer versteinerten Überreste, ihrer großen Formenvielfalt und ihrer scheinbar hohen Evolutionsrate zählen sie zu einer der am besten untersuchten Gruppen fossiler Wirbelloser.

Neben ihrer logarithmischen planspiralen Form sind ihre regelmäßig angeordneten Rippen, die parallel zur Öffnung verlaufen, das wohl auffälligste Merkmal der Ammonitenschale. Sie stammen wahrscheinlich von dem gleichen mechanischen Konflikt, der auch zu den spitz herausragenden Stacheln anderer Tiere führt – obwohl die beiden Muster auf den ersten Blick vollkommen verschieden erscheinen. Die formverändernden Kräfte sind offenbar die gleichen, aber sie wirken mit anderer Stärke auf unterschiedliche Geometrien.

Während des Wachstumsprozesses bleibt die Schalenöffnung der Ammoniten stets kreisförmig. Wenn der Durchmesser des Mantels die Öffnung übersteigt, zieht er sich zwar zusammen – allerdings in diesem Fall nicht so stark, dass er dabei einknickt. Vielmehr drückt der komprimierte Mantel nach außen, und der Schalendurchmesser nimmt im nächsten Schritt wieder zu, während die langsam verkalkende generative Zone diese Ausdehnung bremst.

Wir glauben, dass die beiden entgegengesetzten Kräfte ein oszillierendes System darstellen: Um die Kompression zu vermindern, dehnt sich der Mantel aus, schießt dabei aber über das Ziel hinaus und ist gespannt wie eine Feder. Daraufhin zieht er sich zusammen und landet erneut in einem stark komprimierten Zustand.

Als wir einen solchen »morphomechanischen Oszillator« mathematisch modellierten, bestätigte die Simulation unsere Hypothese: Sie produzierte die erwarteten regelmäßigen Rippen, deren Abstand und Höhe mit wachsender Größe des Weichtiers zunahmen. Diese Eigenschaft haben alle bekannten Ammoniten gemeinsam.

Außerdem beobachteten wir, dass die Rippen schwächer ausgeprägt sind, wenn die Ausdehnungsrate der Schale groß ist. Das heißt, je schneller die Größe der Schalenöffnung ansteigt, desto glatter ist die Schale. Das erklärt einen evolutionären Trend, den Paläontologen seit über 100 Jahren kennen: Ausgewachsene Schalen mit wenigen Windungen erscheinen meist glatter.

Unsere Ergebnisse liefern aber auch eine einfache mechanische und geometrische Erklärung für ein zweites schon lange bestehendes Rätsel der Weichtierentwicklung. Die Schalen des gemeinen Perlboots und seiner Verwandten – eine Gruppe, die als Nautiliden bekannt ist – sind seit mindestens 200 Millionen Jahren im Wesentlichen glatt geblieben, weshalb einige Experten vermuten, dass sich die Gruppe in diesem Zeitraum offenbar nicht weiterentwickelt hat. Tatsächlich werden die wenigen heute noch lebenden Nautilidarten im Pazifischen und Indischen Ozean häufig als »lebende Fossilien« bezeichnet. Unser biophysikalisches Wachstumsmodell zeigt jedoch, dass die glatten Schalen nur eine mechanische Folge der schnellen Ausdehnung der Schalenöffnung ist. Die Nautiliden könnten sich daher stärker weiterentwickelt haben, als ihre äußere Form vermuten lässt. Da Paläontologen die einzelnen Arten aber größtenteils durch die charakteristischen Verzierungen unterscheiden, lässt sich die tatsächliche Evolutionsrate dieser Tiere schwer abschätzen.

Die Schalen von Weichtieren dienen häufig als Modell, um die Musterbildung in der Natur im Allgemeinen zu verstehen – allerdings bergen sie noch viele Rätsel. Ein kurzer Spaziergang durch eine gut sortierte Sammlung von Schneckenhäusern und Muschelschalen genügt, um Formen zu entdecken, die Wissenschaftler bisher nicht erklären können. So gibt es Verzierungen wie das fraktale Muster vieler Stachelschnecken, deren Ursprung noch vollkommen unbekannt ist. Zudem rätseln Forscher, warum etwa 90 Prozent der Schneckenhäuser im Uhrzeigersinn gewunden sind. Und obwohl wir wissen, dass auch die Umwelt das Schalenwachstum beeinflusst, ist noch unklar, inwiefern sie sich auf die Schalenform auswirkt. Doch das Verständnis der physikalischen Kräfte, die an der Entwicklung dieser Tiere beteiligt sind, wird sicherlich bei der Aufklärung der offenen Fragen helfen. ◂

QUELLEN

Chirat, R. et al.: Mechanical basis of morphogenesis and convergent evolution of spiny seashells. Proceedings of the National Academy of Sciences 110, 2013

Erlich, A. et al.: Morphomechanics and developmental constraints in the evolution of ammonites shell form. Journal of Experimental Zoology, Part B 326, 2016

LITERATURTIPP

Goriely, A.: The mathematics and mechanics of biological growth. Springer, 2017

Das Buch gibt eine Einführung in die mathematische Theorie des biologischen Wachstums. Anhand einiger Beispiele arbeitet der Autor die wesentlichen Mechanismen heraus, die äußere Formen in der Natur prägen.

Spektrum PLUS+

Ihre Vorteile als Abonnent

Exklusive Extras und Zusatzangebote für alle Abonnenten von Magazinen des Verlags **Spektrum** der Wissenschaft



SANTOELIA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Kostenfreie **Exkursionen** und **Begegnungen**

3. 6. 2019	Redaktionsbesuch bei **Spektrum**.de, Heidelberg
5. 7. 2019	Leserexkursion zu EUMETSAT, Darmstadt

Eigene **Veranstaltungen** und ausgewählte Veranstaltungen von **Partnern** zum **Vorteilspreis**

12.–14. 4. 2019	Symposium Kortizes »Hirn im Glück«, Nürnberg
10. 5. 2019	Schreibwerkstatt bei **Spektrum** der Wissenschaft, Heidelberg
2. 5. 2019	Lesung von Steve Ayan »Ich und andere Irrtümer: Die Psychologie der Selbsterkenntnis«, Berlin
8. 5. 2019	Lesung von Steve Ayan »Ich und andere Irrtümer: Die Psychologie der Selbsterkenntnis«, Heidelberg
23. 5. 2019	Lesung von Steve Ayan »Ich und andere Irrtümer: Die Psychologie der Selbsterkenntnis«, Stuttgart
25.–28. 6. 2019	Konferenz »The Science of Consciousness (TSC) 2019«, Interlaken
19. 7. 2019	Schreibwerkstatt bei **Spektrum** der Wissenschaft, Heidelberg

Digitales Produkt zum kostenlosen Download und weitere Vorteile

Download des Monats im April: **Gehirn&Geist-Dossier** »Das Geheimnis des Denkens«
Englischkurs von Gymglish: zwei Monate lang kostenlos und unverbindlich testen

Leserreisen

Vorteilspreis auf ausgewählte ornithologische Reisen bei birdingtours
Fünftägige Spektrum-Leserreise nach Bern »Auf den Spuren von Albert Einstein«, organisiert von Wittmann Travel
Islands faszinierende Geologie, zwei besondere Exkursionen durchgeführt von Mol Reisen

Weitere Informationen und Anmeldung:
Spektrum.de/plus



FREISTETTERS FORMELWELT

MANCHE ZIFFERN SIND GLEICHER

Ein paar Zahlen austauschen, um weniger Steuern zu zahlen: Wie soll das Finanzamt das schon merken? Ganz einfach – mit Mathematik.

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

spektrum.de/artikel/1626476

Im Dezimalsystem verwenden wir die zehn Ziffern 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 und 9, um daraus unendlich viele Zahlen aufzubauen. Man könnte meinen, dass alle Ziffern etwa gleich häufig auftreten, wenn man große Datensätze betrachtet. Tatsächlich ist das aber sehr oft nicht der Fall, wie das »benfordsche Gesetz« beschreibt:

$$p(d) = \log_{10}\left(1 + \frac{1}{d}\right)$$

Hier entspricht $p(d)$ der Wahrscheinlichkeit, dass d die erste Ziffer einer Zahl ist. Demnach findet man in 30,1 Prozent der Fälle eine 1 an erster Stelle, während durchschnittlich nur 4,6 Prozent der Zahlen eines Datensatzes mit einer 9 beginnen.

Intuitiv ist das leicht zu verstehen. Bei den Zahlen von 0 bis 9 tritt jede Ziffer genau einmal auf. Zwischen 10 und 19 steht überall die 1 am Anfang, und erst ab 99 ist das Verhältnis wieder ausgeglichen. Die darauf folgenden Zahlen 100 bis 199 beginnen aber jedes Mal wieder mit einer 1. Weil sie die kleinste Ziffer ist (führende Nullen schreiben wir nicht auf), taucht die 1 in empirischen Daten am häufigsten als erste Ziffer einer Zahl auf.

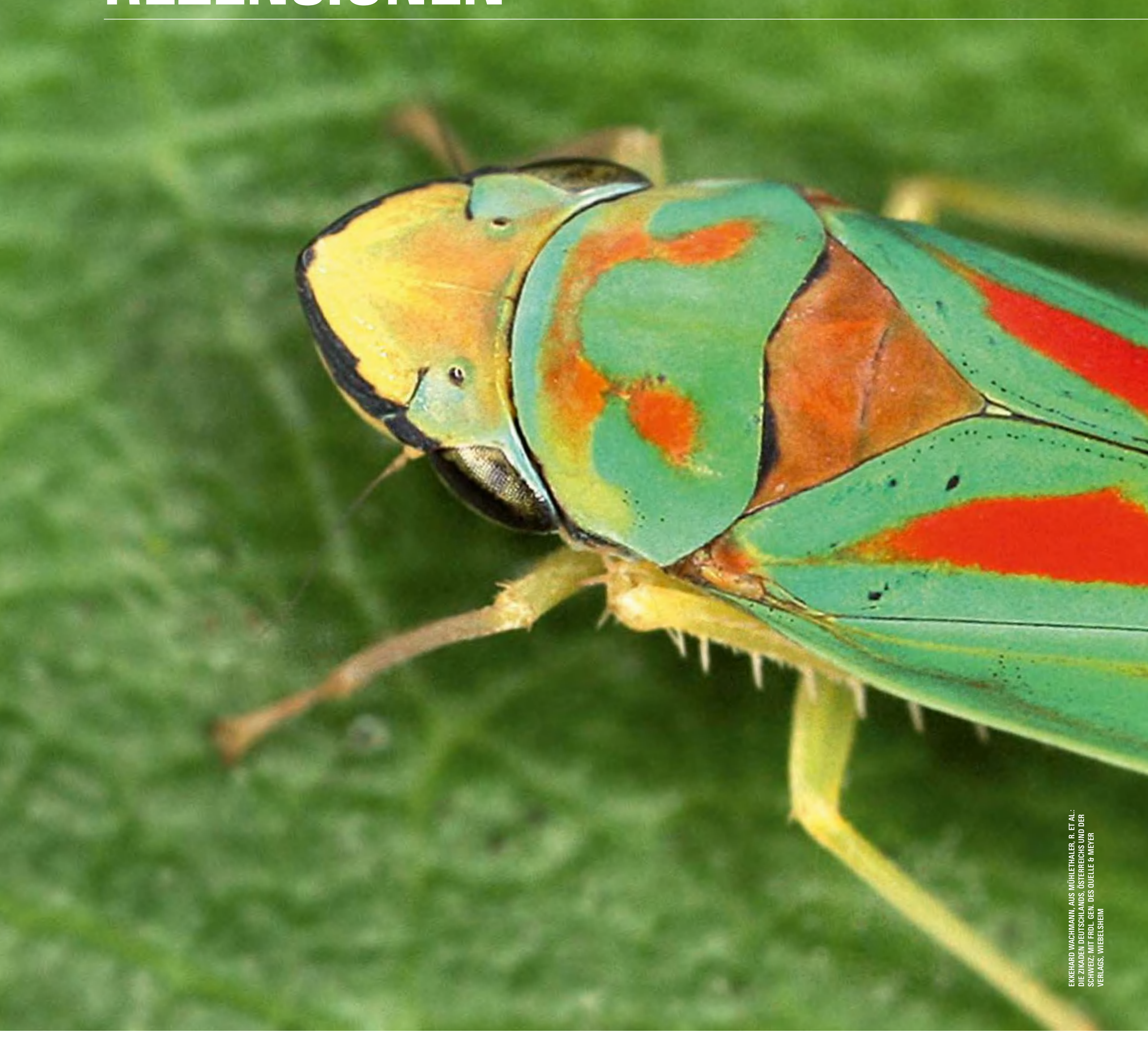
Der kanadische Astronom Simon Newcomb bemerkte diesen Zusammenhang erstmals 1881. Damals gab es noch keine Taschenrechner, so dass man Logarithmen in dicken Büchern nachschlagen musste. Newcomb fiel dabei auf, dass die Seiten, bei denen es um Zahlen mit einer 1 am Anfang ging, sehr viel abgenutzter waren als die anderen. Er schloss daraus, dass solche Zahlen häufiger auftreten. Doch seine Entdeckung blieb mehrere Jahrzehnte unbeachtet. Erst 1938 nahmen Wissenschaftler das unerwartete Phänomen wahr, als der US-amerikanische Physiker Frank Benford die gleiche Beobachtung machte wie Newcomb.

Das benfordsche Gesetz gilt nicht für jede Zahlenmenge. Zunächst braucht man genügend empirische Daten, die einen ausreichend großen Zahlenbereich abdecken. Außerdem müssen die Werte echt sein, manipulierte Zahlen weichen in der Regel von dieser Gesetzmäßigkeit ab. Wissenschaftler von der Universität Wien haben zum Beispiel untersucht, ob die Preise von Produkten unmittelbar nach der Einführung des Euro im Jahr 2002 dem benfordschen Gesetz folgten – was der Fall war. Aber schon bald danach zeigten sich Abweichungen, als Händler die durch den Währungswechsel »krummen« Preise auf die üblichen Werte anpassten, die knapp unter einer runden Summe liegen (zum Beispiel 2,99 Euro).

Auch heute wird das benfordsche Gesetz genutzt, um manipulierte Daten aufzuspüren. Wer etwa in einer Steuererklärung irgendwelche Beträge erfindet, wird dabei höchstwahrscheinlich auffällige Unstimmigkeiten produzieren. Das Gleiche gilt für die Fälschung von Forschungsergebnissen bis hin zur Manipulation von Wirtschaftsdaten, wie sie Griechenland nachweislich zwischen 2005 und 2008 betrieben hat. Der Astronom Boudewijn F. Roukema behauptet sogar, mit Hilfe des benfordschen Gesetzes Anomalien bei den Präsidentschaftswahlen 2009 im Iran entdeckt zu haben. Doch viele Mathematiker bezweifeln, dass sich die Regel wirklich auf Wahlergebnisse anwenden lässt.

Das benfordsche Gesetz gilt übrigens nicht nur im Dezimalsystem, sondern immer, wenn Ziffern zu Zahlen zusammengesetzt werden. Dem strengen Blick der Mathematik kann man nicht entkommen – ganz gleich wie unerfreulich die Steuererklärung ausfallen mag.

REZENSIONEN



EKKEHARD WACHMANN, AUS MÜHLETHALER, R. ET AL.: DIE ZIKADEN DEUTSCHLANDS, ÖSTERREICHS UND DER SCHWEIZ; MIT FRDL. GEN. DES QUELLE & MEYER VERLAGS, WIEBELSHEIM

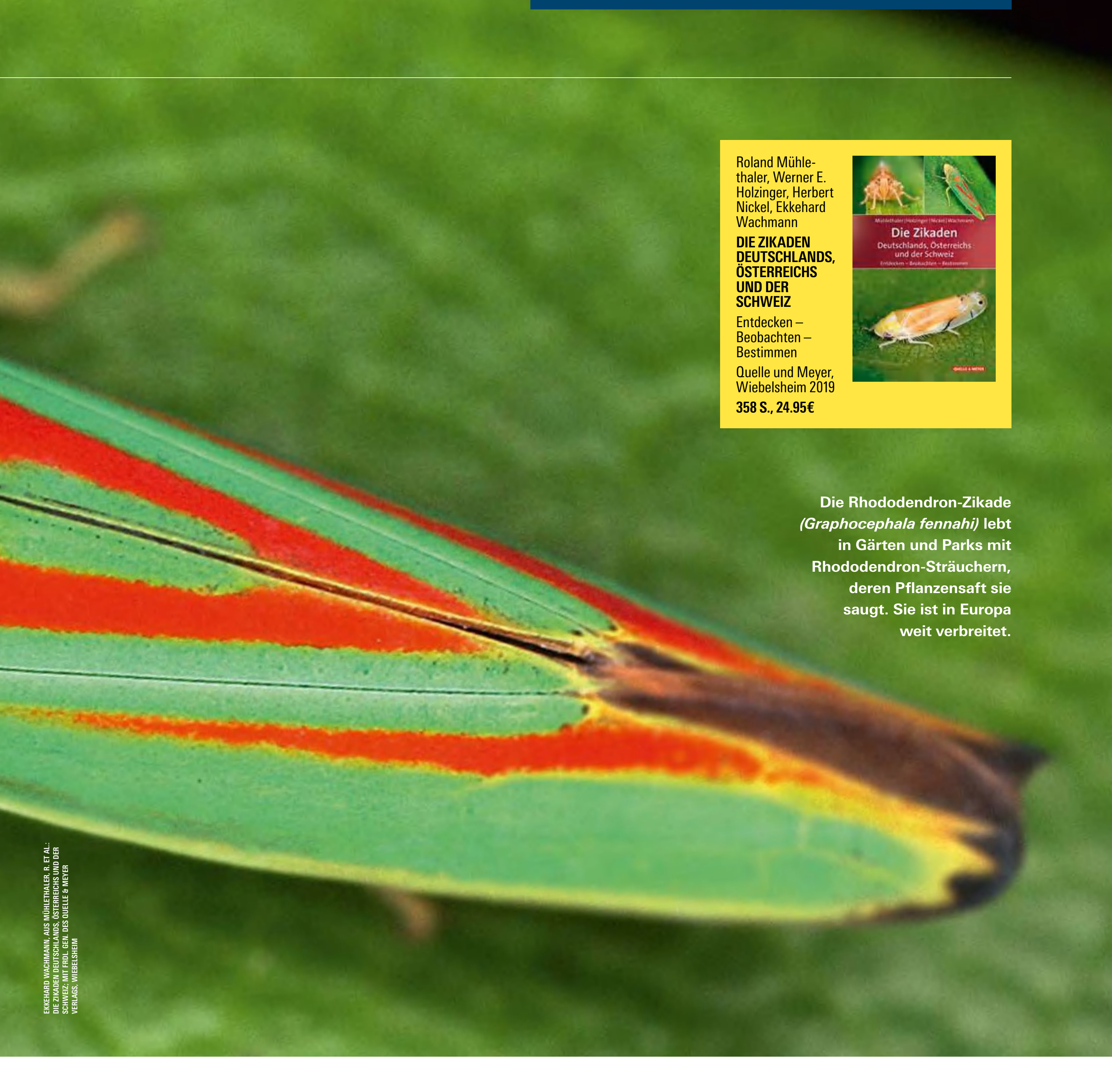
ENTOMOLOGIE

SÄNGER AUF UNSEREN WIESEN

Ein neuer Naturführer stellt die etwa 350 Zikadenarten Mitteleuropas gelungen vor.

Die moderne Agrarlandschaft bekommt den Insekten offenbar schlecht: Seit Jahrzehnten geht ihre Artenvielfalt stark zurück. Die Ausmaße des Insektensterbens erschrecken: Caspar A. Hallmann von der Radboud University und seine Kollegen beispielsweise haben 2017 herausgefunden, dass in den zurückliegenden 30 Jahren rund 75 Prozent der Fluginsekten in deutschen Naturschutzgebieten verschwunden sind. Vor diesem Hintergrund erscheint es dringender denn je, mehr über die Sechsbeiner zu wissen, um sie besser schützen zu können.

Da ist ein Buch willkommen, das sich mit den Zikaden befasst, einer überaus wichtigen Unterordnung der Insekten. Sie gehören zur Ordnung der so genannten Schnabelkerfe (Hemiptera) und stellen rund 50 Pro-



Roland Mühlethaler, Werner E. Holzinger, Herbert Nickel, Ekkehard Wachmann

DIE ZIKADEN DEUTSCHLANDS, ÖSTERREICHS UND DER SCHWEIZ

Entdecken – Beobachten – Bestimmen

Quelle und Meyer, Wiebelsheim 2019

358 S., 24.95€

Die Rhododendron-Zikade *(Graphocephala fennahi)* lebt in Gärten und Parks mit Rhododendron-Sträuchern, deren Pflanzensaft sie saugt. Sie ist in Europa weit verbreitet.

EKKEHARD WACHMANN, AUS MÜHLETHALER, R. ET AL.: DIE ZIKADEN DEUTSCHLANDS, ÖSTERREICHS UND DER SCHWEIZ; MIT FRDL. GEN. DES QUELLE & MEYER VERLAGS, WIEBELSHEIM

zent von diesen. Bekanntere Schnabelkerfe sind die stinkenden Baumwanzen, die juckenden Bettwanzen und die Blattläuse, die unsere Rosen so lieben.

Vielen sind die Singzikaden bekannt, die am Mittelmeer zu hören sind, oder jene, die im Sommer zur typischen Geräuschkulisse des japanischen Landraums beitragen. Doch nur wenigen ist bewusst, dass hunderte kleinere Zikadenarten unsere mitteleuropäischen Wiesen besiedeln. Auch der Rezensent, ein auf Käfer spezialisierter Biologe, wusste vor der Lektüre nicht besonders viel über sie. Doch obwohl die mitteleuropäischen Zikaden nicht so laut auf sich aufmerksam machen wie ihre Verwandten am Mittelmeer, verdienen sie ebenso viel Beachtung. Dieser Band stellt sie sehr gelungen vor.

Zikaden und ihre Larven nehmen hier zu Lande einen wichtigen Platz im Nahrungsnetz ein; sie werden von kleinen Säugetieren, Vögeln, Reptilien, Amphibien gejagt, aber auch von vielen räuberischen Wirbellosen. Sie können grasbewachsene Biotope zu Tausenden pro Quadratmeter besiedeln und fallen dort aufmerksamen Wanderern auf, wenn sie zur Seite springen.

Form, Färbung, Gesänge, Verhalten sind bei Zikaden sehr vielfältig, wie aus dem Naturführer hervorgeht. Mit seinen vielen Abbildungen macht er den Einstieg ins Thema zum Vergnügen. Die hohe Qualität der Makrofotografien erleichtert es, die häufigsten Zikadenarten der deutschsprachigen Länder zu bestimmen. Der ausführliche Einführungsteil schafft die Grundlagen, um sich mit Morphologie, Evolution und Ökologie der Zikaden vertraut zu machen und ihre Rolle als Beutetiere, Pflanzenfresser und manchmal auch als wirtschaftlich relevante Schädlinge zu verstehen. Die Tiere können sogar als Indikatoren für den Zustand unserer Landschaften dienen.

Der Band, der von vier Experten erstellt wurde, enthält einen leicht verständlichen Bestimmungsschlüssel für die fünfzehn europäischen Zikadenfamilien. Er liefert detaillierte Beschreibungen zu Morphologie, Lebensraum und Verbreitung der häufigsten Arten. Auch im Hinblick auf vorhergehende Werke, etwa das umfassende Bestimmungsbuch »Die Zikaden Deutschlands« (Robert Biedermann und Rolf Niedringhaus, 2004) oder den »Fotoatlas der Zikaden Deutschlands« (Herbert Nickel, Rolf Niedringhaus und Gernot Kunz, 2011), überzeugt das Buch als ausführlicher, schön illustrierter und zudem relativ günstiger Naturführer.

»Die Zikaden Deutschlands, Österreichs und der Schweiz« richtet sich an alle Naturinteressierten und kann sowohl Laien, Gärtner und Landwirte als auch Entomologen begeistern. Den Autoren ist ein verständliches Werk gelungen, das selbst Biologen noch viel Neues vermittelt. Wer weiß beispielsweise, dass die Entwicklung einer Zikade von einer Woche bis zu 17 Jahre dauern kann? Oder dass Zikaden in der Mythologie des antiken Griechenlands als Symbol für Unsterblichkeit gesehen wurden? Das handliche Buch passt in so gut wie jede Tasche und ist ein nützlicher Begleiter beim nächsten Spaziergang in der Natur.

Der Rezensent Mehdi Khadraoui ist Biologe und arbeitet am Insect-Fungus Lab der Universität Würzburg.

PHILOSOPHIE

BRAUCHT DIE NATURFORSCHUNG EINE METAPHYSISCHE GRUNDLAGE?

In der Regel kommen Forscher bei ihrer Arbeit ohne Philosophie zurecht. Ein neues Buch bringt nun eine »Metaphysik der Wissenschaft« ins Gespräch.

Philosophen bezeichnen die gewöhnliche Einstellung der Naturwissenschaftler als Naturalismus. Damit ist die Überzeugung gemeint, dass es in der Welt mit rechten Dingen zugehe: Die Natur mag zwar immer wieder für Überraschungen gut sein, aber diese lassen sich stets als Ergebnis gewisser regelhafter Zusammenhänge erklären. Für alles, was in der Welt vorgeht, existieren natürliche, das heißt mit den Mitteln der empirischen Forschung feststellbare Ursachen. Mit anderen Worten: Wunder, also diesen Rahmen sprengende »übernatürliche« Ursachen, gibt es nicht.

Martin Mahner
NATURALISMUS
Die Metaphysik der Wissenschaft
Alibri, Aschaffenburg 2018
246 S., € 18,00



So weit, so gut. Mit dieser Einstellung hat die mathematische Naturwissenschaft ihren historisch einmaligen Siegeszug angetreten, und ihre technischen Anwendungen bestätigen Tag für Tag, wie recht sie hat. Doch sind damit schon alle Probleme erledigt? Bekanntlich streiten die Gelehrten noch immer über die Rolle des messenden Beobachters bei der Deutung der Quantenphysik. Und: Viele Mathematiker erleben ihre Tätigkeit als Entdeckung objektiver Strukturen, nicht als bloßes Erfinden beliebiger Gedankenspiele. Heißt das nun, die Mathematik existiere unabhängig vom menschlichen Bewusstsein, und wenn ja, wo und wie? Und was ist mit dem Bewusstsein selbst? Wenn es sich restlos als Hirnaktivität erklären lässt, wo bleiben dann unsere subjektiven Erlebnisse, die doch etwas qualitativ ganz Anderes zu sein scheinen, etwas irreduzibel Privates?

Martin Mahner, Wissenschaftsphilosoph und promovierter Biologe, will zeigen, dass solche Fragen im Rahmen des Naturalismus eine befriedigende Antwort finden können. Allerdings handelt es sich um philosophische Probleme, und deshalb braucht der Naturalismus für ihre Lösung eine entsprechende Grundlage, die Mahner die »Metaphysik der Wissenschaft« nennt.

Nun ist Metaphysik ein Begriff, den man heute eher mit wissenschaftsferner Spekulation verbindet. Mahner meint damit aber Naturphilosophie oder Wissenschaftstheorie; er will nur betonen, dass es ihm im Sinn des ursprünglichen griechischen Worts um etwas »jenseits der Physik« geht.

Stark geprägt hat den Autor ein Studienaufenthalt bei dem argentinischen Philosophen und Physiker Mario Bunge, einem erklärten philosophischen Materialisten, der unter anderem den deutschen Naturphilosophen Bernulf Kanitscheider (1939–2017) beeinflusste. Bunge und Mahner gehören zu jenen naturalistisch-materialistischen Denkern, die explizit zeigen möchten, dass wir keine übernatürlichen, übersinnlichen oder rein geistigen Wesenheiten brauchen, um die gesamte Wirklichkeit zu erfassen. Diese philosophische Argumentation hat es allerdings nicht leicht. Bei den meisten praktizierenden Naturforschern rennt sie offene Türen ein und wird als überflüssig empfunden. Bei religiösen Menschen hingegen – zu denen auch Naturwissenschaftler zählen können – sowie bei vielen Philosophen stößt sie auf Widerspruch. Besonders zwei Punkte sorgen für andauernden Streit: Lassen sich geistige Erlebnisse durch materielle Prozesse erklären? Und: Welchen »ontologischen Status« – welches Dasein – billigen wir Allgemeinbegriffen zu, insbesondere den Zahlen und der Mathematik?

Lässt man den ersten Streitpunkt, das Leib-Seele-Problem, einmal beiseite, bleibt als zweiter das so genannte Universalienproblem. Sind Allgemeinbegriffe – Universalien – freie Schöpfungen des menschlichen Geistes, oder existieren sie in irgendeiner Weise unabhängig vom menschlichen Bewusstsein? Falls es sich um beliebige Gedankengebilde handelt, warum passen sie dann so gut auf die Wirklichkeit? Selbst Einstein bezeichnete die Tatsache, dass die Mathematik hervorragend zur Naturbeschreibung taugt, als unerklärliches Wunder.

Mahner neigt dazu, mathematische Begriffe als sprachliche Werkzeuge zu betrachten, die der Natur äußerlich sind. Er lehnt Kanitscheiders Versuch ab, den Erfolg der mathematischen Naturbeschreibung durch eine Übereinstimmung von mathematischen und natürlichen Strukturen zu erklären. Die Natur, so Mahner, bestehe aus Dingen, nicht aus Strukturen.

Doch wie können Universalien die Natur erfassen, wenn diese bloß ein Sammelsurium aus Einzeldingen darstellt? Nehmen wir den Begriff der biologischen Art. Eine Spezies wie der Gemeine Schimpanse *(Pan troglodytes)* ist zunächst nur ein Allgemeinbegriff für eine Menge von Lebewesen. Ihm entspricht aber etwas Reales, nämlich die gemeinsame Herausbildung von Populationen im Zuge der biologischen Evolution. Darwins Vorstellung von der Auffächerung der Arten ist somit nicht nur ein gedankliches Ordnungsschema, sondern spiegelt die wirkliche Naturentwicklung wider. Es gibt also durchaus Entsprechungen zwischen begrifflichen und realen Strukturen, die über das bloße Benennen von Einzeldingen hinausgehen.

Mahners Argumentation überzeugt daher nicht vollends. Ein Naturalismus, der den Strukturbegriff ernster nimmt, als der Autor das tut, könnte die »Metaphysik der Wissenschaft« in einem wichtigen Punkt bereichern. In der Philosophie der Physik geschieht das neuerdings mit dem so genannten Strukturenrealismus.

Der Rezensent Michael Springer ist Physiker und Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

GESCHICHTE
ENTSCHEIDENDER HISTORISCHER UMBRUCH?

War das 6. vorchristliche Jahrhundert eine epochale Wende in der Menschheitsgeschichte?

Es mutet die meisten Menschen – auch Nichtgläubige – selbstverständlich an, die geschichtliche Zeitrechnung auf Christi Geburt zu beziehen und in ein »Davor« und »Danach« zu unterteilen. Dass das eine rein willkürliche Konvention ist, machen sich die wenigsten bewusst. Nach dem Zweiten Weltkrieg haben Geschichtsphilosophen begonnen, sich intensiv mit solchen Konstruktionen auseinanderzusetzen und sie als »abhängige Variable kultureller, besonders religiöser Grundeinstellungen« kritisch zu betrachten.

Damit zusammen hängt das Konzept der so genannten Achsenzeit, das der Philosoph Karl Jaspers (1883–1969) in seinem Buch »Vom Ursprung und Ziel der Geschichte« (1949) vorstellte. Demnach entstanden um 500 v. Chr. an den verschiedensten Orten der Welt wichtige Denkschulen: in China die Lehren des Konfuzius und Laotse; in Mittelasien jene des Zarathustra; in Indien der Buddhismus; in Griechenland die Umweltbeschreibung der Naturphilosophen, die den Grundstein der heutigen Wissenschaften legte. Diese »kognitiven Zündungen« deutete Jaspers als entscheidenden historischen Umbruch, der jene Achse sei, an der sich eine globale Menschheitsgeschichte orientieren solle. Seine Sichtweise bedeutete einen radikalen Bruch mit der gewohnten christlich-westlichen Deutungshoheit.

Jan Assmann widmet diesem geschichtsphilosophischen Ansatz das gleichnamige Buch. Der emeritierte Professor hat sich vor allem als Ägyptologe und Kulturwissenschaftler einen Namen gemacht. Gemeinsam mit seiner Frau Aleida Assmann hat er die Theorie vom kulturellen Gedächtnis entwickelt, das das Gemeinschaftsgefühl und Weltbild der Menschen forme. Für ihre Arbeiten zur Erinnerungskultur erhielt das Ehepaar im vergangenen Jahr den Friedenspreis des deutschen Buchhandels.

Assmann war bereits als Schüler von Jaspers Abhandlung fasziniert, die ihn auch bei seiner späteren Arbeit stark beeinflusste, wie er in der Einleitung schreibt. Ausführlich stellt der Autor die Wurzeln des Achsenzeitkonzepts vor, die bis in die Anfänge der Sprach- und Kulturwissenschaften im 18. und 19. Jahrhundert reichen. Damals entdeckten Abraham Hyacinthe Anquetil-Duperron und Jean-Pierre Rémusat als erste europäische Wissenschaftler die Philosophien Zarathustras und Laotses, die sie und spätere Altertumsforscher mit historisch bekannten Denkschulen verglichen, beispielsweise mit jenen Griechenlands und Ägyptens. Einige erkannten dabei frappante Ähnlichkeiten und schlossen auf einen großen Einfluss östlicher Philosophien auf die europäische Kultur. Andere hingegen, wie Georg Wilhelm Friedrich Hegel, betonten eine überlegene Kulturentwicklung Europas, ganz im Zeitgeist des Kolonialismus.

Jan Assmann
ACHSENZEIT
Eine Archäologie der Moderne
C.H. Beck, München 2018
352 S., € 26,95



Beide Perspektiven behandelt Assmann in seinem Buch. In jeweils eigenen Kapiteln stellt er die verschiedenen Vordenker chronologisch sortiert vor. Dabei schafft er es, den Lesern einen guten Einblick in die geschichtsphilosophischen Strömungen vom späten 18. Jahrhundert bis in die Nachkriegszeit zu gewähren, die zur Herausbildung des Achsenzeitkonzepts führten. Zudem erörtert der Autor, wie dieses Konzept in der heutigen Wissenschaft nachwirkt.

Das Werk ist historisch recht tiefgängig und arbeitet mit philosophischen Querverweisen, die den Lesern ein gewisses Maß an Vorbildung abfordern. Außerdem behindern die vielen Originalzitate den Lesefluss. Insgesamt jedoch erscheinen die Inhalte sehr übersichtlich und gut strukturiert sowie fundiert dargestellt. Das Buch stellt sicherlich keine leichte Lektüre dar, ist dennoch äußerst lesenswert, denn es lädt dazu ein, das gewohnte Geschichtsverständnis kritisch zu hinterfragen. Es lässt sich vor allem historisch und philosophisch interessierten Laien empfehlen, aber auch Fachleuten und Studierenden der archäologischen Disziplinen, in deren Ausbildung solche geschichtsphilosophischen Betrachtungen oft nur wenig Platz finden.

Die Rezensentin Verena Leusch ist Volontärin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

MATHEMATIK
UNENDLICHES FÜR KINDER

Ein Mathematiker erläutert Unendlichkeitskonzepte kindgerecht: mit Tieren auf einem Bauernhof.

Hilberts Hotel mit seinen unendlich vielen Zimmern kann auch in voll belegtem Zustand stets einen Überraschungsgast aufnehmen. Man bittet einfach alle bisherigen Gäste, in das Zimmer mit der jeweils nächsten Nummer umzuziehen, und hat Zimmer eins für den Neuankömmling frei. Das funktioniert, denn ein letztes Zimmer gibt es nicht. Mit etwas aufwändigerem Umziehen gelingt es auch, unendlich viele neue Gäste oder gar die Reisenden aus unendlich vielen Bussen mit jeweils unendlich vielen Passagieren in der ausgebuchten Herberge unterzubringen (siehe auch **Spektrum** 4/2000, S. 112).

Kinder empfinden allerdings den Aufenthalt in Hotels gemeinhin als eher nervig. Lieber gehen die Kleinen wohl auf einen Bauernhof. Einen solchen, auf dem sich ein schöner Urlaub mit Besichtigung des Unendlichen erleben lässt, stellt uns der Mathematiker Richard Evan Schwartz in diesem Buch vor. Auf seiner »Infinite Farm« gibt es allerlei zu sehen. Rosie beispielsweise, die Kuh mit den unendlich vielen Beinen, liebt Schuhe über alles, trägt aber schon einen an jedem Fuß. Und wenn sie nun noch ein Paar geschenkt kriegt? Kein Problem. Sie steigt mit dem jeweils n-ten linken Fuß in den (n–1)ten linken Schuh, danach dasselbe mit rechts – nicht gleichzeitig, sonst müsste sie ja alle Füße zugleich in der Luft haben –, und schon ist das erste Fußpaar frei für die neuen Schuhe. Das Verfahren ist im Prinzip dasselbe wie bei Hilberts Hotel.

Hammerwood, das Krokodil, hat so lange Süßigkeiten genascht, bis an jeder Stelle seiner unendlich langen Schnauze neun von zehn Zähnen der Karies zum Opfer gefallen sind. Da werden unendlich viele Ameisen als Kieferorthopäden tätig, indem sie starke Gummibänder von verbliebenem Zahn zu verbliebenem Zahn spannen. Vom hintersten Backenzahn geht das Gummi an einen Pflock, der in der Erde steckt, auf welcher auch das Krokodil unverrückbar ruht. Über Nacht erweichen sich auf wundersame Weise der Ober- und der Unterkiefer, und das Gummi zieht die Beißerchen von der unendlich fernen Schnauzenspitze backenzahnwärts. Wohlgemerkt: Jeder Zahn wandert dabei nur eine endliche Strecke. Am Morgen räumen die Ameisen die Bänder ab, und schon erstrahlt das Gebiss lückenlos wie zu gesunden Zeiten.

Schwartz, Mathematikprofessor an der Brown University in Providence (Rhode Island), belässt es in seinem Kinderbuch nicht bei dieser vergleichsweise harmlosen Sorte Unendlichkeit, die unter dem Namen »abzählbar« bekannt ist. Er stellt auch Delores, die Tintenfischdame, vor, die einen eher korallenähnlichen Körperbau hat: Jeder ihrer Arme teilt sich in zwei, diese teilen sich abermals in zwei und so weiter. An jeder Verzweigung trägt sie einen Armreif. Das sind so unendlich (»überabzählbar«) viele, dass sie ohne Weiteres ihre Freundin für eine Party mit einer kompletten Dekoration ausstatten kann und ihrerseits nach wie vor vollständig beringt ist. Nur das Übergabeverfahren ist nicht ganz einfach.

Der Autor hat sein Buch in erster Linie für Kinder geschrieben. Zumindest die größeren unter ihnen werden schon bald die naheliegenden Fragen stellen: Hat der unendliche Bauernhof auf der endlichen Erde überhaupt Platz? Und wenn das Krokodil seine unendlich lange Schnauze aufmacht, bewegt sie sich dann nicht weit vorn schneller als das Licht?

Auf die erste Frage hält die Mathematik sogar eine Antwort bereit.

Richard Evan Schwartz
LIFE ON THE INFINITE FARM
American Mathematical Society, Providence, Rhode Island 2018
176 S., € 31,50



Vielleicht steckt der ganze Bauernhof ja in einer so genannten Poincaré-Kugel mit hyperbolischer Geometrie (siehe **Spektrum** 2/2010, S. 49). Von außen sieht diese aus wie eine gewöhnliche Kugel, aber für ihre Einwohner werden die Entfernungen umso größer, je mehr sie sich dem Kugelrand nähern. Auf jene Weise haben unendliche Entfernungen in einem endlichen Volumen Platz.

Den ernsthaften physikalischen Fragen jedoch hält die Geschichte vom unendlichen Bauernhof nicht lange stand. Schwartz spricht das auch offen an: In seiner Fantasiewelt sind die Naturgesetze keine unerbittlichen Aufpasser, die einem Atom jede unerlaubte Bewegung verbieten, sondern eher trottelige Kontrolleure, die ab und zu nach dem Rechten sehen, aber vor gewissen Verstößen konsequent die Augen verschließen.

Es gelingt dem Autor, auf überaus originelle Weise verschiedene Konzepte der Mathematik anschaulich zu machen. Und zwar, ohne diese beim Namen zu nennen. Wozu auch: Die Kinder könnten mit den wissenschaftlichen Erläuterungen wenig anfangen, und für die Erwachsenen gibt es Erläuterungen zum Buch im Internet

(https://www.ams.org/publications/authors/books/postpub/mbk-115). Deutschsprachige Leser im Zielgruppenalter werden ohnehin ihre Eltern um Lesehilfe bitten müssen; darüber hinaus werden selbst die Großen an den fantasievollen Ideen Gefallen finden.

Die Bebilderung dagegen – na ja. Wahrscheinlich soll sie kindgerecht sein; ich finde es jedoch ziemlich lieblos, wie der Autor seine Tierwelt mit den einfachsten Formen illustriert, die das Zeichenprogramm hergibt, und die Seiten bis zum Rand mit Farbflächen ohne jede Abstufung vollklatscht.

Eine Frage bleibt offen: Warum befassen sich Mathematiker mit solch seltsamen Tieren? Die Antwort hätte Schwartz sogar innerhalb seiner Erzählung geben können. Das Schönste an Rosie ist, dass sie zwar über alle wesentlichen Eigenschaften einer Kuh verfügt, aber keine Kuhfladen produziert! Oder etwas abstrakter ausgedrückt: Es ist manchmal äußerst hilfreich, wenn man das, was einem stinkt und was man auf andere Weise nicht loswird, ins Unendliche abschieben kann.

Der Rezensent Christoph Pöppe ist Mathematiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

AMERIKANISTIK
BRUDERKRIEG

Vor 500 Jahren eroberten spanische Konquistadoren das Reich der Azteken. Ohne die Hilfe einheimischer Kräfte wäre ihnen das kaum gelungen.

Im März 1519 betrat der spanische Konquistador Hernán Cortés mit einer Truppe von wenigen hundert Mann erstmals das amerikanische Festland. Rund zwei Jahre später lag Tenochtitlan, die Hauptstadt des Aztekenreichs, in Trümmern, und die Spanier hatten das Fundament für ein Kolonialreich gelegt, das Jahrhunderte überdauern sollte. Was genau innerhalb dieser kurzen Zeit in Mexiko passierte, ist nebulös. Zwar liegen schon aus dem 16. Jahrhundert nicht wenige Quellenberichte darüber vor; Cortés selbst unterrichtete die Krone ausgiebig. Doch sowohl Augenzeugen als auch Chronisten konstruierten dabei nicht selten ihre eigenen Wahrheiten – sei es aus politischen Interessen heraus oder einfach, um die Geschehnisse schlüssig verbunden darzustellen.

Diese »Inszenierungsleistungen« hinterfragt der Historiker Stefan Rinke in seinem Buch »Conquistadoren und Azteken« und bezieht dabei auch die wenigen Zeugnisse ein, welche die Perspektive der indigenen Bevölkerung widerspiegeln. Er legt frei, was wir wirklich über den Fall Tenochtitlans wissen, und macht so deutlich, wie spannend wissen-

schaftliche Quellenkunde sein kann. Der Autor, der als Professor für Geschichte Lateinamerikas an der Freien Universität Berlin lehrt und hier zu Lande zu den profiliertesten Kennern der Materie zählt, stellt die Motive, Perspektiven und Hintergründe der einzelnen Akteure differenziert heraus und räumt ganz nebenbei mit Mythen auf, die sich bis heute um die Eroberung Amerikas ranken. Rinke schildert nicht nur die Eroberungszüge, sondern erklärt, wer sich da eigentlich begegnete und aus welcher Ausgangssituation heraus.

Auf der einen Seite standen vor allem junge Spanier aus niederem Adel

Stefan Rinke
CONQUISTADOREN UND AZTEKEN
Cortés und die Eroberung Mexikos
C.H.Beck, München 2019
399 S., € 28,00



(so genannte Hidalgos), die sich von einem Engagement in der »Neuen Welt« sowohl Reichtümer als auch Karrierechancen erhofften. Die Verbreitung des christlichen Glaubens (die offiziell zur Begründung der Eroberungszüge diente) hatten sie dabei weniger im Sinn, eher konzentrierten sie sich auf die Jagd nach Sklaven. Dem Autor gelingt es konzise und eindrücklich, Cortés' Biografie und zugleich die damalige politische Landkarte nachzuzeichnen. Zudem fängt er nicht nur die Gier der Konquistadoren nach Gold ein, sondern auch ihr Staunen über das Unbekannte.

Auf der anderen Seite war das prosperierende Reich der »Mexica«, so der Eigenname der Azteken. Im Lauf des 15. Jahrhunderts hatte dieses ursprünglich aus dem Norden stammende Volk seine Einflusssphäre durch kriegerische Expansion deutlich vergrößert. Rinke beschreibt gut verständlich, wie Gesellschaft, Wirtschaft und Religion der Mexica funktionierten. Er fächert das Mächteverhältnis in der Region auf und bietet den Lesern somit eine perfekte Grundlage, um die Dimensionen des 1519 entstehenden Konflikts nachvollziehen zu können.

Denn es waren eben nicht nur ein paar verwegene Glücksritter vom anderen Ende der Welt, die Mittelamerika auf einen Schlag neu ordneten, weil sie über bessere Waffen und Pferde verfügten und von ihren Gegnern für Götter gehalten wurden. Vielmehr sahen die Feinde Tenochtitlans im Zweckbündnis mit den Neuankömmlingen die Chance, sich von der Herrschaft der Mexica und deren Tributforderungen zu befreien und einen lange währenden Konflikt militärisch zu lösen. Sie unterstützten die Spanier mit Lebensmitteln, vor allem aber mit Truppen. Während der Kämpfe standen sich zehntausende einheimische Krieger gegenüber – die Konquistadoren machten numerisch nur einen kleinen Teil davon aus. Sie hatten zwar durch ihre überlegene Bewaffnung einen größeren Einfluss, doch ohne die Hilfe etwa der Tlaxcalteken und anderer Verbündeter wären sie vermutlich untergegangen. Cortés siegte vor allem dadurch, dass er die verschiedenen einheimischen Mächte für seine Interessen einspannte, lenkte und gegeneinander ausspielte.

Zudem brachten die Spanier einen unsichtbaren Feind mit, der unter den mesoamerikanischen Völkern einen schrecklichen Tribut forderte: die Pocken. Berechnungen von Historikern zufolge starben nach dem Ausbruch einer Epidemie im Jahr 1520 binnen zwölf Monaten etwa 40 Prozent der Einwohner Zentralmexikos. Weitere Seuchenwellen folgten. Nicht zuletzt diese demografische Katastrophe machte es möglich, dass die Konquistadoren nicht nur das Reich der Mexica zerstörten, sondern schließlich die Vorherrschaft in der gesamten Region übernahmen.

Der Rezensent Sebastian Hollstein ist Wissenschaftsjournalist in Jena und schreibt regelmäßig für »Spektrum.de«.

DIGITALISIERUNG
GEFÄHRDET MASSENHAFTES DATENSAMMELN DIE DEMOKRATIE?

Politikwissenschaftler Eric Mülling legt eine Doktorarbeit darüber vor, wie sich Big Data auf den zivilen Protest auswirkt.

Mit dem Siegeszug des Internets verknüpfte sich einst die Hoffnung, es werde eine transnationale Cyber-Agora schaffen und die Autokraten aus ihren Palästen fegen. Das World Wide Web, dessen Freischaltung 1993 – zwei Jahre nach dem Zerfall der Sowjetunion – erfolgte, sollte die Demokratisierung beschleunigen. Der Internetpionier John Perry Barlow postulierte 1996 in seiner »Unabhängigkeitserklärung des Cyberspace«: »Regierungen der industriellen Welt, ihr müden Giganten aus Fleisch und Stahl, ich komme aus dem Cyberspace, der neuen Heimat des Geistes. (…) Wo wir uns versammeln, besitzt ihr keine Macht mehr.«

Von diesem Aufbruchsgeist ist nicht viel übrig geblieben. Autoritäre Regime zensieren das Netz, Technologiekonzerne überwachen Nutzer, Meinungsroboter torpedieren den politischen Diskurs. Ist das Internet statt eines Ermächtigungswerkzeugs vielleicht das genaue Gegenteil davon, nämlich ein Kontrollmittel?

Der Politikwissenschaftler Eric Mülling versucht, das in seiner Dissertation »Big Data und der digitale Ungehorsam« zu beantworten. Er stützt seine Untersuchung auf verschiedene Konzeptionen des Begriffs »Ungehorsam«, unter anderem die des amerikanischen Schriftstellers Henry David Thoreau (1817–1862), und orientiert sich dabei auch am deutschen Diskurs. Der zivile Ungehorsam, schreibt Mülling, ziele erstens auf eine »Änderung von als ungerecht empfundenen Gesetzen« ab, habe also klar eine normative Stoßrichtung. Zweitens strebe er eine »Sichtbarmachung von Zivilitätsdefiziten« an, indem er an den Gerechtigkeitssinn der Bürger appelliere. Drittens sei kennzeichnend, dass

Eric Mülling
BIG DATA UND DER DIGITALE UNGEHORSAM
Springer VS, Wiesbaden 2019
260 S., € 49,99, eBook: € 39,99

sich Ungehorsam gewaltfrei vollziehe. Auf dieser theoretischen Grundlage entwickelt Mülling verschiedene Thesen, zum Beispiel »Digitaler Ungehorsam entpolitisiert politisierte Fragen« oder »Big-Data-Analysen festigen den Status quo einer Zivilgesellschaft«. Im empirischen Teil des Buchs versucht der Autor, diese Thesen anhand von Experteninterviews zu prüfen. Er spricht hierzu mit Protestakteuren, unter anderem mit Daniel Domscheit-Berg, dem ehemaligen Sprecher der Enthüllungsplattform Wikileaks, sowie dem Journalisten Markus Beckedahl von netzpolitik.org. Die transkribierten Interviews wertete er anschließend anhand bestimmter Kategorien aus.

Müllings Fazit fällt ambivalent aus. Die Interviewpartner verweisen einerseits auf die negativen Auswirkungen von Big Data, etwa die Analyse von Telekommunikationsdaten im Rahmen der Vorratsdatenspeicherung oder die im öffentlichen Raum installierten Überwachungstechnologien wie die Gesichtserkennung. Diese seien dem zivilen Ungehorsam abträglich, denn Big Data schränke Aktivisten ein und kompromittiere die vertraulichen Grundlagen digitalen Protests. »Die in Algorithmen eingeflossenen Annahmen, die gebildet sind an der gegenwärtigen Mehrheitsmeinung, stabilisieren den Ist-Zustand einer Gesellschaft«, analysiert der Politologe. Protest könne sich nur schwer bilden, wenn er ständigem Konformitätsdruck ausgesetzt sei.

Zugleich aber provozierten ebenjene datenanalytischen Prognosetechniken, mit denen menschliches Verhalten vorhergesagt werden soll, die digitalen Aktivisten dazu, ihre Appelle an die Mehrheitsgesellschaft zu richten. Big Data sei also sowohl Blockierer als auch Anstifter des digitalen Ungehorsams.

Der Autor hat eine theoretisch fundierte, kenntnisreiche und methodisch saubere Dissertation vorgelegt, die den Lesern die politische Dimension des Datensammelns vor Augen führt und von den Prüfern zu Recht mit der Bestwertung »summa cum laude« ausgezeichnet wurde. Mülling hat mehrere Jahre an der Schnittstelle von Informatik und Politikwissenschaft geforscht – ein Feld, das bislang leider kaum bestellt ist und mehr solcher Arbeiten benötigt. Im theoretischen Teil wären noch etwas mehr Verweise auf Nachbardisziplinen wie die Medienwissenschaft wünschenswert gewesen, wo der italienische Medientheoretiker und Philosoph Matteo Pasquinelli mit seinem Aufsatz zur »Gesellschaft der Metadaten« ein Grundlagenkonzept erarbeitet hat. Auch das Konzept des digitalen Ungehorsams wirkt in der Gesamtschau etwas unterspezifiziert. Müllings Dissertation ist dennoch ein wichtiger Debattenbeitrag, der sich wohltuend vom Jargon der Politikwissenschaft abhebt und einem interessierten Fachpublikum empfohlen werden kann.

Der Rezensent Adrian Lobe arbeitet als Journalist in Heidelberg und ist Autor der Kolumne »Lobes Digitalfabrik« auf »Spektrum.de«.

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie Geschichte), Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de

Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Tim Kalvelage, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik).

Bezugspreise: Einzelheft € 8,50 (D/A/L), sFr. 14,–; im Abonnement € 89,– für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,– im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,– ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.

Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel: 06221 9126-741

Eine Anzeigenbuchung ist auch über iq media marketing gmbH möglich.

Ansprechpartnerin Anja Väterlein: anja.vaeterlein@iqm.de

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, Tel: 06221 9126-733, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1. 1. 2019.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562, Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



LESERBRIEFE

FRAGWÜRDIGE ARGUMENTATION

Der Verhaltens- und Evolutionsbiologe Kevin Laland vertritt die These, die herausgehobene Stellung des Menschen beruhe auf seiner kulturellen Begabung. (»Ein einzigartiges Wesen«, **Spektrum** Januar 2019, S. 12)

Eduard Kirschmann, Hannover: Der Beitrag behandelt zwei völlig unterschiedliche Fragestellungen parallel. Einmal die Frage, wodurch sich der Mensch am stärksten von anderen Tieren unterscheidet, und dann noch die nach der Evolution seines Gehirns.

Dass Menschen Satelliten bauen, unterscheidet sie sehr deutlich von allen anderen Lebewesen. Es ist aber völlig belanglos, wenn es darum geht, warum sich unser Gehirn unter altsteinzeitlichen Bedingungen entwickelt hat. Wenn wir uns mit der Evolution des Gehirns befassen, sind dessen moderne Anwendungen nicht nur irrelevant, sondern verwirrend. Lässt man sie beiseite, dann bleiben die alte Jäger-Hypothese und die ebenso alte Annahme, dass der Mensch von Natur aus ein Kulturwesen ist – also die Kulturfähigkeit eine Anpassungsleistung ist, die im Verlauf der menschlichen Evolution positiv selektiert wurde. Dann erhebt sich allerdings die Frage, warum nur wir Menschen sie so konsequent entwickelt haben. Eine evolutionstheoretisch plausible Antwort bleibt der Autor schuldig. Auf eine angebliche Schwelle zu verweisen, die nur Menschen bisher überwunden haben, ist lediglich eine Umformulierung der Fragestellung. Sehr anspruchsvolle Anpassungsleistungen wie das Fliegen oder das Sehen haben sich in der Evolutionsgeschichte mehrmals unabhängig voneinander entwickelt – warum nicht die Kulturfähigkeit? Hier fehlt der Versuch, potentielle Fitnesskosten zu benennen, die ihrer Evolution entgegenstehen könnten. Eine verlängerte Jugendphase vermindert zum Beispiel die Fitness. Bei der Jäger-Hypothese fehlt der Versuch, zu erklären, warum *Homo floresiensis*, ein Werkzeuge herstellender, Feuer nutzender Großwildjäger, mit einem schimpansengroßen Gehirn auskam.

Fragwürdig sind auch Feststellungen, welche die Jäger-Hypothese bestätigen sollen. So heißt es: »Ein Beispiel wäre eine bessere visuelle Wahrnehmung, was die Nachahmung über größere Entfernungen oder die Imitation feinmotorischer Bewegungen ermöglichte.« Dass der Mensch, ein nachgewiesenermaßen körperlich an das Werfen, also an die Nutzung von Distanzwaffen angepasstes Lebewesen, eine verbesserte räumliche Wahrnehmung entwickelt hat, soll also belegen, dass er von Natur aus ein Kulturwesen ist? Auch eine »Stärkung der Verbindung zwischen motorischen und sensorischen Hirnstrukturen« ließe sich problemlos als Werferanpassung interpretieren.

Im Januar 2019 startete eine sechsteilige Serie zur Frage, was uns besonders macht.



Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

ALTE IDEE KOMMT AN

Die Chronomedizin untersucht, wie die Wirksamkeit von Medikamenten vom Zeitpunkt der Verabreichung abhängt. (»Im Einklang mit dem inneren Taktgeber«, **Spektrum** Februar 2019, S. 44)

Christian Monnerjahn, Magdeburg: Vielen Dank für diesen Beitrag! Es ist interessant zu lesen, dass die – an sich recht alte – Idee zu einer Chronomedizin langsam in der Arzneimitteltherapie ankommt. Solche Ansätze sind schon vor 30 bis 40 Jahren vorgeschlagen worden, als die Genetik und Zellbiologie der zirkadianen Rhythmen langsam aufgeklärt wurde.

NUR EINE THEORIE VON VIELEN

Die Biologin Jena Pincott berichtet über eine häufig verkannte Krankheit, unter der Millionen Frauen leiden. (»Gewebe auf Abwegen«, **Spektrum** Dezember 2018, S. 38)

Martina Liel, Glasgow (Schottland): Ich bin ja froh, dass überhaupt über Endometriose geschrieben wird. Danke schon mal dafür! Aber dass sich, wie in dem Artikel behauptet, bei Endometriose Zellen aus der Gebärmutter in anderen Körperregionen ansiedeln, ist bisher nur eine von mehreren Theorien. Endometriosezellen stammen jedenfalls nicht aus der Gebärmutterschleimhaut. Auch Frauen, die ohne Gebärmutter auf die Welt gekommen sind, können Endometriose haben. Und sogar Männer nach Hormonbehandlung. Eine alternative Theorie besagt, jede Frau hätte Endometriose, nur die meisten eben ohne Symptome. Nicht das Gewebe an sich sei das Problem, sondern die Vorgänge darin. Die Ursachen sind bis heute unbekannt. Und schwillt wirklich das Endometriosegewebe an? Manche Experten sagen, es sei eher das Umgebungsgewebe auf Grund der biochemischen Vorgänge an den Läsionen (sprich Zytokine und andere entzündungsfördernde Stoffe). Es gibt viele Theorien, die weder bestätigt noch widerlegt sind. Niemand weiß bisher, was Endometriose wirklich ist. Und wenn wir immer nur über die eine Theorie sprechen, dann kommen wir nicht weiter.

BEWUSSTSEIN LEDIGLICH EINE ILLUSION?

Das Rätsel des menschlichen Bewusstseins beschäftigt die Psychologin Susan Blackmore. (»Das schwierigste Problem«, **Spektrum** Februar 2019, S. 30)

Karl Hostettler, Aadorf: Eine große Schwierigkeit liegt schon im Wort Bewusstsein. Was verstehen wir darunter? Das Wort vermischt zwei Sachverhalte, die nichts miteinander zu tun haben müssen: unser Erleben, das uns auch oft im Schlaf begleitet (wobei wir uns des Vorgangs meistens nicht bewusst sind), und das Erleben im wachen Zustand, in welchem wir meistens um unsere Existenz wissen. Wir müssen beides unterscheiden können! Denn ich nehme an, dass Erleben nicht auf uns Menschen beschränkt ist, während das Wissen, dass wir sind, möglicherweise weitgehend eine menschliche Besonderheit darstellt.

Jörg Berning, Haukeland (Norwegen): Der Artikel beleuchtet sehr informativ den Stand der Bewusstseinsforschung. Ich vermisse allerdings einen Hinweis auf die Bedeutung von Spiegelneuronen in diesem Forschungsfeld. Meiner Meinung nach wären Spiegelneuronen naheliegende Kandidaten für die Erklärung und Erforschung von Bewusstsein – beim Menschen und bei Tieren. Es liegt auf der Hand, dass die Fähigkeit, zum Beispiel das Verhalten von Beutetieren oder Artgenossen zu modellieren, einen immensen Evolutionsvorteil mit sich bringt. Womit das Entstehen von Spiegelneuronen im Lauf der Evolution einleuchtet. Die weitere Entwicklung kann dann sehr folgerichtig zur Fähigkeit geführt haben, komplexe Verhaltensmuster mitzuvollziehen und vorauszuprojizieren – und dann eben auch eigenes Verhalten und Denken zu reflektieren. Womit Bewusstsein entstünde. Mit Spiegelneuronen als Ausgangspunkt für Bewusstsein ergibt sich auch automatisch ein fließender Übergang von rein instinktgesteuerten Wesen bis hin zur Fähigkeit der bewussten Selbstanalyse.

Walter Bühler, Berlin: Ohne Sprache kann es weder Philosophie noch Wissenschaft geben. Frau Blackmore hat einen Text geschrieben, den ich bewusst gelesen habe. Da er in einer Zeitung mit wissenschaftlichem Anspruch erschienen ist, gehe ich davon aus, dass sie ihn nicht unter Hypnose oder im Rausch, sondern mit vollem Bewusstsein geschrieben hat. Insofern besteht für mich gar kein Zweifel, dass Frau Blackmore ebenso wie ich über Bewusstsein verfügt. Offen ist allenfalls die Frage, ob sie »bewusst« ihre Augen vor der eigenen Realität und vor dem eigenen Handeln verschließen will. Ihr Schlusssatz ist ein virtuoses Sprachkunststück (das absolut nichts mit einer naturwissenschaftlichen Argumentation zu tun hat): »Wir Menschen sind einzigartig, weil nur wir allein so klug sind, dass wir uns täuschen lassen und glauben, es gebe ein bewusstes Ich.« Wenn Frau Blackmore, die sich in neckischer Weise als eine »Illusionistin« outet, wirklich an ihrem eigenen Bewusstsein (und damit an ihrem eigenen Text) zweifeln würde, warum sollte ich dann als Leser ihren Beitrag überhaupt ernst nehmen und meine Zeit damit verschwenden? Nein, Frau Blackmore, machen Sie sich keine Sorgen: Sie leben und Sie verfügen über Bewusstsein. Und wenn Sie nicht mehr wissen, was Bewusstsein ist, dann versuchen Sie sich doch einfach daran zu erinnern, wie es war, als Sie Ihren Beitrag geschrieben haben. Insofern können wir ganz gelassen auf den ersten wissenschaftlichen Artikel warten, in dem ein Tier sein Bewusstsein selbst beschreibt. Dann erübrigen sich viele Diskussionen.

Liebe Leserin, lieber Leser,

ab der Ausgabe 5.19 gibt es folgende Preisänderungen:

Der Einzelverkaufspreis erhöht sich um 40 Cent, die Preise des Abonnements um 34 Cent, für Schüler und Studenten um 18 Cent pro Ausgabe.

Wir bitten um Ihr Verständnis.

Die Verlagsleitung

Im freien Fall

Einblick in die Arbeitswelt der Zukunft.
Eine Sciencefiction-Kurzgeschichte von Miriam Pharo

Als der rote Schraubenschlüssel am Rand meines Blickfelds aufblinkt, stehe ich unter der Dusche. Einen Moment lang bin ich wie versteinert, unfähig, das Gesehene zu begreifen. Ich fahre mir über die Augen, doch der rote Schraubenschlüssel prangt immer noch vor meinem Gesicht. Ein Jobangebot! Das erste seit zwölf Jahren.

Lange war ich davon überzeugt, dass die betriebsbedingte Kündigung nur ein kleiner Rückschlag wäre, aus dem ich bald erstarkt hervorgehen würde. Ein Irrtum. Die bittere Wahrheit war, dass die Robotisierung unserer Welt viele Berufsgruppen obsolet gemacht hatte. Während Biotechniker und Psychodesigner für KIs ihre Glanzzeit erlebten, steuerte ich als Elektroingenieur offenen Auges meinem Untergang entgegen. Ich war motiviert und voller Elan. So voller Elan, dass ich letzten Endes durch die Maschine ersetzt wurde, die ich mit erschaffen hatte.

Früher hatte ich ein Haus, eine Frau und ein stattliches Gehalt. Heute wohne ich in einem Mietsbunker am Stadtrand, wo ich mir das Zimmer mit einem Kerl mit Schweißfüßen teile. Um mich über Wasser zu halten, repariere ich Haushaltsgeräte und Service-Roboter.

»Jobangebot öffnen«, flüstere ich, während ich aus der Gemeinschaftsdusche steige, um mich abzutrocknen. Ein Fenster poppt auf meiner Hornhaut auf, versehen mit dem Logo von Bachchan Industries, einem der größten Tech-Unternehmen des Kontinents. Gleichzeitig setzt das begleitende Audio ein. In freundlichen Worten ersucht man mich um meine Kooperation bei einem neuartigen, auf Nanotech basierenden Fortbewegungsmittel namens Lab.

Per gedanklichen Befehl aktiviere ich meinen Neurokommunikator, um bei YIN, dem Yahoogle Investigation Network, mehr darüber zu erfahren. Ohne Erfolg. Offenbar ist die Technologie so neu, dass Bachchan Industries es unter Verschluss hält.

Die Vorstellung, Teil einer umwälzenden Innovation zu werden, bringt meine Nerven zum Flattern, mehr noch als die Aussicht, mein altes Leben zurückzubekommen. Ich nutze die Zeit bis zum Vorstellungsgespräch, um mir einen Businessanzug in einer On-Demand-Box drucken zu lassen. Einen dunkelblauen Zweireiher mit weißem Stecktuch, der einen Großteil meiner restlichen Ersparnisse verschlingt.

Punkt 15 Uhr stehe ich geschniegelt und gestriegelt vor dem Chivas Building in New Downtown, einem 300-stöckigen Hightech-Habitat, das eben erst fertig gestellt worden ist. Der Anblick ist Schwindel erregend. 900 000 Tonnen Stahl, Glas und Beton, die in den Himmel ragen und deren Spitze man nur erahnen kann. Die Straßen und Gebäude rundum sind wie leer gefegt: ein steriler, auf Hochglanz polierter Stadtteil für die oberen Zehntausend. Das einzige sichtbare Leben spielt sich in der Luft ab, wo autonome Taxis ihre Fahrgäste von A nach B befördern.

In der Lobby begegne ich einem älteren Mann im Anzug, der mit gesenktem Blick an mir vorbei in Richtung Ausgang geht und dabei etwas zu humpeln scheint. Hinter der Eingangstür passiere ich den DNA-Scanner. Sekunden später tritt ein schlanker humanoider Roboter mit elfenbeinfarbener Legierung aus einem der Aufzüge. »Mister Davonport, willkommen!«, begrüßt er mich mit sanfter Stimme. Seine Augen strahlen so blau wie Saphire. Offenbar ist er dafür konzipiert, Menschen für sich einzunehmen. »Mein Name ist Io. Ich hoffe, Sie haben problemlos hierhergefunden.« Ich nicke.

»Gut«, sagt der Roboter, bevor ich etwas hinzufügen kann. »Bitte folgen Sie mir.« Als er voranschreitet, komme ich nicht umhin, seine eleganten, beinahe raubtierhaften Bewegungen zu bewundern. Ich folge ihm in den Aufzug, der wie von Geisterhand startet, ohne dass irgendein Knopf betätigt worden wäre. Ohne die Spur einer Vibration sausen wir hoch, der Magnetschwebetechnik sei Dank. Eigentlich habe ich damit gerechnet, dass das Treffen auf einer der unteren Ebenen stattfinden würde, doch zu meiner Überraschung fahren wir bis ganz nach oben. Io führt mich in ein riesiges Penthouse-Büro mit weißen Säulen und Marmorboden.

»Vor 14 Jahren haben Sie an der Entwicklung schwebender Nanostäbchen mitgewirkt«, sagt er freundlich. »Aus diesem Grund sind Sie heute hier.«

»Ich verstehe«, entgegne ich, während ich versuche, mir meinen Stolz nicht zu sehr anmerken zu lassen. »Und dafür danke ich Ihnen.«

Kurz bleibe ich vor dem Panoramafenster stehen, um den Blick über die Skyline von New Downtown schweifen zu lassen. Ich bin wieder im Spiel, denke ich, und spüre Genugtuung in mir emporsteigen. Io berührt mich leicht an der Schulter. »Kommen Sie. Ich möchte Ihnen etwas zeigen.«

Er tritt auf den angrenzenden Balkon hinaus und zeigt auf eine noch höher gelegene Plattform, die in der Luft zu schweben scheint. Dort steht ein mit Efeu bewachsener, schwärzlich grauer Turm, umgeben von einem verwilderten Garten, wie man ihn von alten Kalenderblättern kennt.

»Von dort oben hat man einen herrlichen Blick«, verkündet der menschenartige Roboter mit einem schwärmerischen Unterton, wie die Situation es von ihm verlangt. »Wir nennen den Turm Pigeon Cliff. Ein Rückzugsort für unsere wichtigsten Mieter.« Neugierig blicke ich mich um. »Und wie kommt man da hoch?«

Statt zu antworten, ruft Io: »Lab aktivieren!«

In meinem Magen kribbelt es. Und dann gerät auch noch die Luft vor uns in Bewegung. Knapp über dem Boden formt sich eine Art Nebel und kondensiert mitten in der Luft zu einer wabernden Pfütze. Io setzt einen Fuß darauf, stützt sich ab und macht einen Schritt nach oben. Im selben Moment löst sich die Pfütze auf, und die Teilchen flitzen hinüber, um dem vorderen Fuß Halt zu geben. Auf diese Weise erklimmt der Roboter Meter um Meter.

»Die Luft wird mit Nanostäbchen geflutet«, erklärt er. »Ganz gleich, wo ich hintrete, sie ordnen sich zu einer festen Unterlage an.« Inzwischen befindet er sich vier Meter über dem Boden. »Möchten Sie es versuchen? Das System ist für drei Personen gleichzeitig konzipiert.«

Gerade als ich den rechten Fuß heben will, beginnen die Nanostäbchen zu driften

Ich nicke und hebe den rechten Fuß. Schon strömen wie aus dem Nichts die Nanostäbchen heran, um ihn zu stützen. »Wofür steht Lab?«, frage ich, während mein Herz laut und schnell hämmert. Durch die Leere zu schreiten, ist sehr gewöhnungsbedürftig. »Levitation Aerobridge«, antwortet Io, der den Turm beinahe erreicht hat. Es sind gut und gern 20 Meter bis dorthin.

»Wäre es nicht einfacher, hinzufliegen?«, rufe ich ihm zu und erklimme vorsichtig weitere »Stufen«.

»Zum einen ist der Weg das Ziel. Zum anderen herrscht über Pigeon Cliff Flugverbot. Ruhe und Abgeschiedenheit sind oberstes Gebot«, entgegnet der Roboter.

Ich nicke beeindruckt, als eine kalte Brise mich frösteln lässt. Ruhe hin oder her: Der Nachteil großer Höhen ist die unberechenbare Luftströmung. Gerade als ich den rechten Fuß heben will, beginnen die Nanostäbchen unter meinem linken Fuß zu driften. Um den Halt nicht zu verlieren, trete ich mit beiden Füßen auf.

Doch statt sich zu verbinden, stieben die winzigen Partikel auseinander, und ich breche ein wie durch morsches Holz. Kurz scheint die Zeit stillzustehen, dann plumpse ich schreiend in Richtung Balkon. Beim Aufprall fährt ein stechender Schmerz durch meine Wirbelsäule, mich überfällt nackte Panik.

»Keine Sorge«, erklingt prompt die Stimme des Roboters. »Mein Scan zeigt, es ist nur eine Kreuzbeinprellung.« Mühsam rappele ich mich auf und klopfe den Staub von meinem Anzug, das Blut rauscht in meinen Ohren. Nicht auszudenken, wäre ich höher gestiegen. Ich könnte jetzt tot sein!

»Das System war instabil«, erklärt Io, während er langsam zu mir herunterschwebt. »Wir hatten ein Problem mit der Magnetisierung. Wegen der Temperaturschwankung hat sich die Ausrichtung geändert.«

»Ein ferromagnetisches Gitter aus Kobaltoxid könnte Abhilfe schaffen«, werfe ich etwas atemlos ein.

»Lab hat den Vorfall bereits ausgewertet und ist vor 8,36 Sekunden zu der gleichen Lösung gelangt.«

»Oh!« Die Enttäuschung schnürt mir den Hals zu. Ios Mundwinkel verziehen sich leicht. Der Abklatsch eines Lächelns. »Ihre Auffassungsgabe ist löblich, aber deswegen sind Sie nicht hier.«

»Nicht?«

»Nein.« Er macht eine einladende Geste, und wir gehen wieder hinein. Er schreitend, ich humpelnd. »Lizenzen für Fortbewegungsmittel im öffentlichen Raum werden nur dann bewilligt, wenn eine natürliche Person als Verantwortlicher juristisch benannt und registriert wird.«

»Ist das so?«

»Ja. Künstliche Intelligenzen können nicht haftbar gemacht werden«, erklärt Io weiter. »Zwar wird derzeit über eine Gesetzesänderung diskutiert, aber Sie wissen ja, wie so was ist.« Das Leuchten in seinen Augen verblasst ein wenig. »Bis es zu einer Entscheidung kommt, kann es Jahre dauern. In der Zwischenzeit brauchen wir jemanden wie Sie.«

»Einen Ingenieur?«

»Einen Menschen«, entgegnet Io langsam, als wäre ich minderbemittelt. »Natürlich werden wir Sie dafür entlohnen. Allzu viel können wir Ihnen nicht geben. Lab ist nur eine von zahlreichen Innovationen, die wir in diesem Komplex vornehmen. Es gibt also jede Menge Lizenzen zu erteilen. Aber es sollte Ihre Lebenssituation ein wenig verbessern.«

Ich brauche eine Weile, um meine Sprache wiederzufinden. »Nur damit ich Sie richtig verstehe: Sie pfeifen auf mein Fachwissen, für den Knast wäre ich jedoch gut genug?«

Io blickt mich einen Moment ausdruckslos an. »Sind Sie interessiert?«, fragt er schließlich.

Mein Stolz rebelliert. Ich soll für diese Blechbüchse und ihre Spießgesellen als Marionette fungieren, wenn nicht gar als Sündenbock? Unwillkürlich huscht mein Blick zum Panoramafenster. Ich denke an meine kleine, fensterlose Wohneinheit, an die kaputten Kühlschränke und die Schweißfüße meines Mitbewohners.

Lange Sekunden vergehen, dann nicke ich langsam. »Wie sagte meine Frau immer?«, murmele ich. »Lieber den Spatz in der Hand als die Taube auf dem Dach.« Ios Lippen kräuseln sich erneut. »Wie passend.«

Wenige Minuten später humple ich durch die Lobby des Hochhauses. Kurz vor dem Ausgang kommt mir ein Mann im Anzug entgegen. Bedrückt schaue ich zu Boden, gehe an ihm vorbei und trete wenige Augenblicke später ins Freie.

DIE AUTORIN

Miriam Pharo schreibt Romane und Kurzgeschichten im Bereich Sciencefiction und Fantastik. Im Februar 2012 erschien ihre Stellaris-Kurzgeschichte »Ein Missetäter der übelsten Sorte« im Perry-Rhodan-Roman 2686.

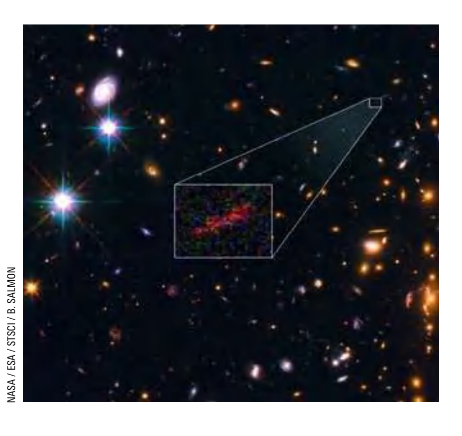
VORSCHAU



DTIMIRAOS / GETTY IMAGES / ISTOCK

DRAMATISCHER INSEKTENSCHWUND

Forscher beobachten über Jahrzehnte einen erschreckenden Rückgang der Biomasse von Fluginsekten. Als Bestäuber spielen die Tiere eine zentrale Rolle in den Ökosystemen und sichern somit auch unsere Ernährung. Warum geht es den Insekten so schlecht, und wie lässt sich ihr Untergang verhindern?



NASA / ESA / STSCI / B. SALMON

URALTE GALAXIEN

Mit einer neuen Beobachtungstechnik haben Astronomen Galaxien aufgespürt, die ihr Licht gerade einmal 500 Millionen Jahre nach dem Urknall auf den Weg geschickt haben. Die Entdeckungen könnten dabei helfen, ein bisher rätselhaftes Kapitel der frühen kosmischen Geschichte zu verstehen.



NASA / JAMES YUNGEL

DIE GROSSE SCHMELZE

Der gigantische Thwaites-Gletscher in der Westantarktis könnte sich bald zurückziehen und rasch abschmelzen. Wissenschaftler versuchen, das Verhalten des Riesen vorherzusagen.



ART & ARTIFICIAL INTELLIGENCE LAB / RUTGERS UNIVERSITY

KREATIVE COMPUTER

Inzwischen erschaffen fortgeschrittene Algorithmen eigenständig außergewöhnliche Bilder, ganz ohne Zutun eines menschlichen Künstlers. Das stellt unsere bisherigen Auffassungen von Kunst radikal in Frage.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter



Georg von Holtzbrinck
Preis für Wissenschaftsjournalismus

AUSSCHREIBUNG 2019

Der Preis wurde von der Verlagsgruppe von Holtzbrinck 1995 anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung von Wissenschaft und Forschung, insbesondere in den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Text (Wortbeiträge Print und Online) und ein Preis in der Kategorie Elektronische Medien (TV, Hörfunk und Multimedia) sowie ein Nachwuchspreis (Jahrgang 1990 oder jünger) vergeben.

Der Preis in den Kategorien Text und Elektronische Medien ist mit je 5.000 Euro dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 Euro dotiert. Bewerben Sie sich bis zum 1. April 2019 mit 3 Beiträgen (Text) bzw. 2–3 Beiträgen (Elektronische Medien) aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter **www.vf-holtzbrinck.de/gvhpreis**.

KONTAKT

Veranstaltungsforum
Holtzbrinck Publishing Group

Taubenstraße 23, 10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20
Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de
www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Eine Shortlist mit den Nominierten wird vor der Bekanntgabe der Preisträgerinnen und Preisträger auf der Webpage veröffentlicht. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (VORSITZ)
Vorsitzender der Geschäftsführung,
Holtzbrinck Publishing Group

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER
Mitglied des Gesellschafterausschusses,
Boehringer Ingelheim

ULRICH BLUMENTHAL
Redakteur „Forschung aktuell“, Deutschlandfunk

PROF. DR. ANTJE BOETIUS
Direktorin, Alfred-Wegener-Institut,
Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)

PROF. DR. MARTINA BROCKMEIER
Vorsitzende, Wissenschaftsrat

PROF. DR.-ING. MATTHIAS KLEINER
Präsident, Leibniz-Gemeinschaft e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER
Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG
Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER
Leiter Redaktion Wissen, DIE ZEIT und Herausgeber, ZEIT Wissen

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER
Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

RANGA YOGESHWAR
Moderator ARD-Sendungen



SPRINGER NATURE

